UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO PV-MCI-BATERÍA PARA REALIZACIÓN DE ENSAYOS EN LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES (LER) USM”

FELIPE ERNESTO ENERO SAAVEDRA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: Dr. Ing. ALEJANDRO SÁEZ C.
PROFESOR CORREFERENTE: Dr. Ing. ÁLEX FLORES M.

SEPTIEMBRE – 2016

Resumen

Un sistema híbrido PV-MCI-Batería es un sistema de generación de energía eléctrica autónomo conformado por un arreglo fotovoltaico, un grupo electrógeno y un banco de baterías.

En este trabajo se muestra el diseño y la implementación de un sistema híbrido PV-MCI-Batería en el Laboratorio de Energías Renovables de la Sede José Miguel Carrera de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Para lograr lo anterior, primero que todo se muestra un estudio de estos sistemas, se caracterizan los componentes constituyentes, se muestran los trabajos hechos al respecto y se exponen los principales sistemas implementados tanto en Chile como en el extranjero.

Por otro lado, se muestran los componentes ofertados en el mercado y los seleccionados para conformar el sistema implementado. También se muestra un manual de uso del sistema y se exponen diferentes perfiles de carga que pueden ser probados.

Se muestran los resultados de un perfil de carga probado en el sistema y se analiza lo observado. Se comprueba que el grupo electrógeno es la principal fuente que entrega energía para las condiciones del experimento.

Finalmente se demuestra que un sistema híbrido PV-MCI-Batería es un sistema de generación de energía eléctrica autónomo e ininterrumpible, que ayuda a disminuir el consumo de energía convencional y por ende la contaminación atmosférica.

Abstract

A PV-Diesel-Battery Hybrid System is an autonomous electric energy generation system conformed by a photovoltaic array, a generating set and a battery bank.

In this paper the design and implementation of a PV-Diesel-Battery Hybrid System in Renewable Energies Laboratory of José Miguel Carrera Campus of Federico Santa María University is shown.

To achieve this, first of all a study of these systems is shown. The constituent components are characterized, papers done about this matter are shown and the mains systems implemented both in Chile and abroad are exposed.

Besides, the components offered on the market and selected components to conform the implemented system are shown. Also, a user manual is presented and different load profiles that can be tried are exposed.

The results of load profile tried in the system are shown and the observed is analyzed. It is verified that the generating set is the principal source that delivers energy for the conditions of the experiment.

Finally it is demonstrated that a PV-Diesel-Battery Hybrid System is an autonomous and uninterruptible electric energy generation system, that it helps to decrease the consumption of conventional energy and as a consequence the atmospheric contamination.

Glosario

LER	:	Laboratorio de energías renovables
PV	:	Fotovoltaico
MCI	:	Motor de combustión interna
Off-Grid	:	Desconectado de la red eléctrica
I_{sc}	:	Corriente de cortocircuito
V_{oc}	:	Voltaje de circuito abierto
P_{max}	:	Potencia máxima
V_{max}	:	Tensión máxima
I_{max}	:	Corriente máxima
DC	:	Corriente continua
AC	:	Corriente alterna
W_p	:	Potencia peak
V_{cc}	:	Tensión en corriente continua

V_{ac}	:	Tensión en corriente alterna
V_{rms}	:	Tensión rms
I_{rms}	:	Corriente rms
φ	:	Ángulo de desfase entre tensión y corriente
E	:	Energía
Δt	:	Intervalo de tiempo

Unidades

[W]	:	Watt
[V]	:	Volt
[A]	:	Ampere
[Ah]	:	Ampere-hora
[Wh]	:	Watt-hora
[VA]	:	Volt-Ampere
[Hz]	:	Hertz
[m^2]	:	Metros cuadrados
[°C]	:	Grados Celsius
[L]	:	Litro
[h]	:	Hora
[$]	:	Peso chileno

Índice de contenidos

Resumen ii
Abstract iii
Glosario iv
Unidades vi
Índice de contenidos vii
Índice de figuras ix
Índice de tablas xi
1 Introducción 1
1.1 Motivación 1
1.2 Objetivos 3
1.2.1 Objetivo general 3
1.2.2 Objetivos específicos 3
1.3 Alcance 4
1.4 Estructura del trabajo 5
2 Marco teórico 6
2.1 Sistemas híbridos PV-MCI-Batería 6
2.2 Componentes de un sistema híbrido PV-MCI-Batería 8
2.2.1 Arreglo fotovoltaico 8
2.2.2 Grupo electrógeno 12
2.2.3 Banco de baterías 14
2.2.4 Inversor 16
2.3 Estado del arte 17
3 Diseño e implementación 20
3.1 Componentes ofertados en el mercado 21
3.1.1 Inversor 21
3.1.2 Grupo electrógeno 22
3.1.3 Paneles fotovoltaicos 24
3.1.4 Batería 26
3.2 Características de los equipos seleccionados 27

3.2.1 Inversor 27
3.2.2 Grupo electrógeno 29
3.2.3 Arreglo fotovoltaico 30
3.2.4 Banco de baterías 32
3.3 Equipos auxiliares 35
3.3.1 Juego de cargas 35
3.3.2 Equipos de medición 36
4 Manual de uso 39
4.1 Conexión de los equipos 39
4.2 Operación del sistema 41
4.2.1 Modos de operación 41
4.2.2 Configuraciones con WatchPower 46
4.3 Perfiles de carga 52
5 Ensayos realizados 55
5.1 Introducción a la teoría 55
5.2 Procedimiento experimental 56
5.3 Resultados obtenidos 58
5.4 Análisis de resultados 62
6 Estimación del valor de la electricidad autogenerada 65
6.1 Inversión 65
6.2 Operación y mantenimiento 66
6.2.1 Operación del grupo electrógeno 66
6.2.2 Mantenimiento del grupo electrógeno 68
6.3 Determinación del costo de generación [$/kWh] 68
7 Conclusiones 69
Referencias 71
Anexos 75

Índice de figuras

Figura 2.1: Esquema de instalación de sistema híbrido PV-MCI-Batería [1]..... 7
Figura 2.2: Diagrama eléctrico de un sistema híbrido PV-MCI-Batería..... 8
Figura 2.3: Curva I-V de una celda fotovoltaica. [2] 9
Figura 2.4: Curva P-V de una celda fotovoltaica [2] 10
Figura 2.5: Incremento en el consumo de combustible vs potencia nominal del generador para distintos porcentajes de cargas [3]. 13
Figura 2.6: Distribución de potencias en un motor de combustión interna [19]. 14
Figura 3.1: Ubicación geográfica del LER. 20
Figura 3.2: Tipos de inversores ofertados en el mercado..... 21
Figura 3.3: Tipos de grupos electrógenos ofertados en el mercado. 23
Figura 3.4: Tipos de paneles fotovoltaicos ofertados en el mercado. 25
Figura 3.5: Tipos de baterías ofertadas en el mercado..... 26
Figura 3.6: Inversor multifuncional seleccionado..... 28
Figura 3.7: Grupo electrógeno seleccionado..... 30
Figura 3.8: Paneles fotovoltaicos seleccionados. 31
Figura 3.9: Detalle de panel fotovoltaico defectuoso..... 32
Figura 3.10: Recomendaciones técnicas para la instalación de la batería según el fabricante del inversor multifuncional [1]. 32
Figura 3.11: Batería seleccionada. 33
Figura 3.12: Sistema híbrido completo. 34
Figura 3.13: Grupo electrógeno, batería y carga aplicada al sistema..... 35
Figura 3.14: Juego de cargas. 36
Figura 3.15: Ampolleta incandescente. 36
Figura 3.16: Ventana principal de la interfaz de usuario del software WatchPower [15]. 37
Figura 3.17: Piranómetro utilizado. 38
Figura 3.18: "Data logger" utilizado. 38
Figura 4.1: Tapa inferior del inversor removida [1]. 39
Figura 4.2: Esquema de conexión de los equipos [1]..... 40
Figura 4.3: Conexiones hechas en el inversor..... 40

Figura 4.4: Pantalla LCD del inversor [1]..... 41
Figura 4.5: Configuraciones básicas de WatchPower [15]. 48
Figura 4.6: Inicio de sesión en WatchPower [15]. 48
Figura 4.7: Configuraciones de distintos parámetros en WatchPower [15]..... 49
Figura 4.8: Perfil de carga diario de una comunidad rural..... 53
Figura 4.9: Perfil de carga diario de una escuela rural..... 53
Figura 4.10: Perfil de carga diario de una carga constante. 54
Figura 5.1: Irradiancia solar y potencia instantánea entregada por el grupo electrógeno y el arreglo fotovoltaico a lo largo del día de medición..... 59
Figura 5.2: Potencia instantánea entregada por las distintas fuentes entre las 11 y las 17 horas. 60
Figura 5.3: Energía entregada por las distintas fuentes en cada hora. 61
Figura 5.4: Porcentaje de energía entregada por cada fuente a lo largo del día de medición. 62

Índice de tablas

Tabla 2.1: Ventajas y desventajas de distintos tipos de celdas fotovoltaicas [2]. 10
Tabla 3.1: Características técnicas de tres diferentes inversores multifuncionales ofrecidos en el mercado. 22
Tabla 3.2: Características técnicas de tres grupos electrógenos encontrados en el mercado. . 24
Tabla 3.3: Características técnicas de tres módulos fotovoltaicos de diferente tipo de celda. 25
Tabla 3.4: Características técnicas de dos baterías de diferente capacidad nominal. 27
Tabla 3.5: Características técnicas del inversor multifuncional seleccionado. 28
Tabla 3.6: Características técnicas del grupo electrógeno seleccionado. 29
Tabla 3.7: Características técnicas del arreglo fotovoltaico utilizado. 31
Tabla 3.8: Características técnicas del banco de baterías utilizado. 33
Tabla 4.1: Descripción del modo de operación "Standby Mode" [1]. 43
Tabla 4.2: Descripción del modo de operación "Fault Mode" [1]. 44
Tabla 4.3: Descripción del modo de operación "Line Mode" [1]. 45
Tabla 4.4: Descripción del modo de operación "Battery Mode" [1]. 46
Tabla 5.1: Carga nominal aplicada durante cada hora. 57
Tabla 6.1: Valores de los equipos utilizados. 65
Tabla 6.2: Valores constantes para calcular los costos de operación del grupo electrógeno. . 66
Tabla 6.3: Costo de operación anual del sistema hibrido implementado. 67

1 Introducción

1.1 Motivación

Existen diversas aplicaciones donde se utilizan grupos electrógenos como fuente principal de energía eléctrica. Pequeños y medianos equipos son utilizados para proveer de energía en localidades donde la red eléctrica es escaza o inexistente. Pequeños grupos electrógenos son utilizados también para suministrar energía a herramientas eléctricas en faenas de construcción. Grupos electrógenos más grandes proveen de energía eléctrica a instalaciones temporales, sistemas de amplificación de audio, eventos estivales, etc. Además, grandes equipos o bancos de grupos electrógenos suministran energía eléctrica a diversos procesos industriales. Estos equipos entregan energía inmediata, suficiente y en el lugar que se necesite, independiente del grado de civilización, cuando se seleccionan adecuadamente en función del trabajo a realizar. Esta tecnología es relativamente fácil de implementar y además se ha probado a lo largo de muchos años. Sin embargo, el combustible utilizados por estos equipos (principalmente combustible Diesel o gasolina y en menor medida gas natural) aumenta su precio año a año y a la vez las reservas de petróleo se agotan irreversiblemente [3]. Además, si el combustible debe ser transportado hasta el lugar de consumo, los costos de generación con grupos electrógenos pueden elevarse considerablemente. También, los gases emanados producto de la combustión contribuyen a la creciente contaminación de la atmósfera.

Por otro lado, una tecnología más nueva que la expuesta anteriormente, son los paneles fotovoltaicos, los cuales entregan energía eléctrica sin consumo de combustible y sin contaminar, en el lugar que se necesite en función de la radiación solar. Además, al mismo tiempo que los combustibles fósiles aumentan su precio año a año, los paneles fotovoltaicos disminuyen su valor sosteniblemente en el tiempo [3]. Sin embargo, para que el panel fotovoltaico entregue energía eléctrica suficiente para suplir la demanda que se le impone, la radiación solar que exista en el momento y lugar de trabajo debe ser la adecuada. La característica intermitente que tiene la radiación solar, con variaciones durante el día y a lo

largo de todo del año, hace que no se pueda trabajar con paneles fotovoltaicos en cualquier momento y lugar, sin las condiciones de radiación solar correctas. Para suplir esta desventaja, se puede contar con sistemas de almacenamiento de energía, como baterías, sin embargo éstas elevan considerablemente el costo de inversión de un sistema de este tipo.

Debido a las ventajas y desventajas de los sistemas de generación de energía eléctrica recién expuestos, surge la idea de diseñar un sistema híbrido que combine las ventajas de cada tecnología. Los sistemas híbridos PV-MCI-Batería son una tecnología nueva, no extensamente probada, la cual es utilizada principalmente en localidades remotas donde no existe red eléctrica. En el ámbito industrial, existen algunas empresas que utilizan sistemas híbridos en sus procesos productivos.

En este trabajo se muestra un estudio de los sistemas híbridos PV-MCI-Batería y su estado del arte. Además, debido a la ausencia de este tipo de sistemas para fines didácticos y de estudio, se diseñó e implementó un sistema híbrido PV-MCI-Batería en el Laboratorio de Energías Renovables de la Sede José Miguel Carrera de la Universidad Técnica Federico Santa María, para que cualquier persona o institución interesada en el área pueda desarrollar pruebas y observe de forma práctica el desempeño de este tipo de sistemas, con el objetivo de aportar al conocimiento y a la investigación de un tecnología que podría llegar a penetrar fuertemente en el futuro.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El presente trabajo tiene como objetivo general desarrollar un sistema híbrido PV-MCI-Batería en el LER para uso didáctico que permita demostrar en forma práctica el desempeño del sistema y sus componentes.

1.2.2 Objetivos específicos

Para lograr el objetivo principal de este trabajo, se han contemplado los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar los sistemas híbridos PV-MCI-Batería y mostrar su estado del arte.
- Caracterizar los elementos constituyentes de un sistema híbrido PV-MCI-Batería.
- Seleccionar los componentes ofertados en el mercado.
- Implementar un sistema híbrido PV-MCI-Batería en el Laboratorio de Energías Renovables.
- Desarrollar un manual de uso del sistema diseñado para ensayos tipo.
- Analizar las pruebas realizadas en el sistema.

1.3 Alcance

En el presente trabajo se hace un estudio de los sistemas de generación de energía eléctrica híbridos conformados por un arreglo fotovoltaico, un motor de combustión interna y un banco de baterías, más conocidos como Sistemas Híbridos PV-MCI-Batería. En este trabajo no se presenta mayor información acerca de otros tipos de sistemas híbridos que contemplen otras fuentes de energía, como energía eólica, por ejemplo. Además, el sistema híbrido no está diseñado para entregar su energía a la red eléctrica, por lo tanto, se realizas pruebas y se concluye sobre el sistema funcionando solo en modo autónomo (Off-Grid).

El sistema diseñado está constituido solo por tecnología probada y disponible en el mercado. En este trabajo no se estudian nuevas tecnologías para constituir un sistema híbrido ni se diseñan circuitos electrónicos u otros sistemas para gestionar la energía de las distintas fuentes.

El objetivo de las pruebas realizadas no es extrapolar información para concluir acerca del funcionamiento del sistema a lo largo de un periodo de tiempo bajo distintas condiciones, sino que el objetivo es mostrar el desempeño del sistema diseñado en condiciones específicas de funcionamiento. Sin embargo, el sistema puede ser probado bajo cualquier condición impuesta, dentro de los rangos aceptados por los equipos constituyentes, para simular el funcionamiento de éste en cualquier tipo de uso, ya sea industrial, residencial, experimental, etc.

Por otro lado, las cargas probadas son de tipo resistivas (ampolletas incandescentes), no se prueban ni se analizan otros tipos de cargas, como inductivas o capacitivas.

1.4 Estructura del trabajo

Para lograr los objetivos planteados, este trabajo se encuentra dividido en seis capítulos, los cuales son descritos a continuación.

Primero que todo, en el capítulo 2, se explica qué es un sistema híbrido PV-MCI-Batería y se detallan los componentes que lo constituyen. Además, se hace una revisión del estado del arte de esta tecnología. Se muestran algunos sistemas híbridos PV-MCI-Batería en operación y en estudio, en ámbitos residenciales e industriales, dentro de Chile y en el extranjero.

En el capítulo 3, se muestran las características del sistema hibrido implementado en el LER y los componentes seleccionados en el mercado. Además se muestra cómo fue implementado el sistema y los accesorios anexos que se requieren para su estudio y funcionamiento.

En el capítulo 4 se muestra un manual de uso del sistema diseñado. Se explica cómo conectar los distintos equipos constituyentes, se muestran los distintos modos de operación y se explica cómo realizar diversas configuraciones. Además, se muestran distintos perfiles de carga que pueden ser probados en el sistema.

A continuación, en el capítulo 5, se muestran los ensayos realizados en el sistema híbrido PV-MCI-Batería implementado en el LER. Se detalla el procedimiento experimental, se muestran los resultados obtenidos, se analiza y se concluye a partir de lo observado.

En el capítulo 6 se muestra una estimación del costo de la energía producida por el sistema híbrido PV-MCI-Batería para un horizonte de proyecto de 10 años. Se compara con el precio de la energía de la red y se concluye al respecto.

Por último, en el capítulo 7, se presentan las conclusiones del trabajo y se proponen futuros estudios.

2 Marco teórico

2.1 Sistemas híbridos PV-MCI-Batería

Un sistema híbrido de generación eléctrica es aquel sistema que combina dos o más fuentes de energía, renovables o convencionales, para producir energía eléctrica. Las fuentes de energía renovable que utilizan estos sistemas pueden ser: solar, eólica, hidráulica, biomasa, etc. La fuente de energía convencional proviene principalmente de un grupo electrógeno accionado por combustibles fósiles como gasolina, Diesel o gas natural. Además, un sistema híbrido puede contar con un sistema de almacenamiento de energía como un banco de baterías. Junto a lo anterior, diversos equipos electrónicos enlazan las distintas fuentes de energía mencionadas para entregar energía eléctrica de la manera más eficiente. También, existen sistemas híbridos que pueden tomar energía de la red eléctrica y además inyectar energía a la red.

Un sistema híbrido PV-MCI-Batería está compuesto elementalmente por: un arreglo fotovoltaico (PV por sus siglas en inglés), un grupo electrógeno (MCI, acrónimo de motor de combustión interna) y un banco de baterías. Además, un inversor multifuncional se encarga de invertir la corriente continua en alterna y viceversa, cargar el banco de baterías y gestionar el funcionamiento de las distintas fuentes de energía.

Un sistema híbrido PV-MCI-Batería, que tiene como prioridad el uso de la energía proveniente del arreglo fotovoltaico, alimentará la carga con energía solar siempre cuando esté disponible y sea suficiente. Cuando existe un exceso de energía solar, ésta se almacena en el banco de batería para su posterior utilización. Sin embargo, debido a la característica variable de la energía solar, el grupo electrógeno es el que alimenta la carga base en un periodo de 24 horas. Por otro lado, cuando la energía que solicita la carga es mayor a la energía que puede proporcionar el arreglo fotovoltaico, el banco de baterías inyecta su energía almacenada, y si aun así es insuficiente o ambas fuentes están agotadas o no están

presentes, el grupo electrógeno debe alimentar la carga. De esta forma, se disminuye el uso del grupo electrógeno, ahorrando combustible y disminuyendo la contaminación atmosférica.

La Figura 2.1 muestra los principales componentes de un sistema híbrido y como éstos se interrelacionan.

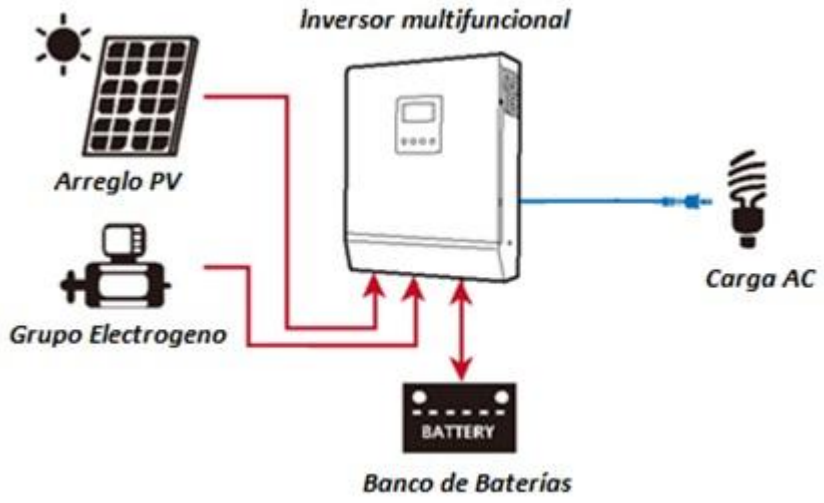


Figura 2.1: Esquema de instalación de sistema híbrido PV-MCI-Batería [1].

La Figura 2.2 muestra un diagrama eléctrico del esquema anterior.

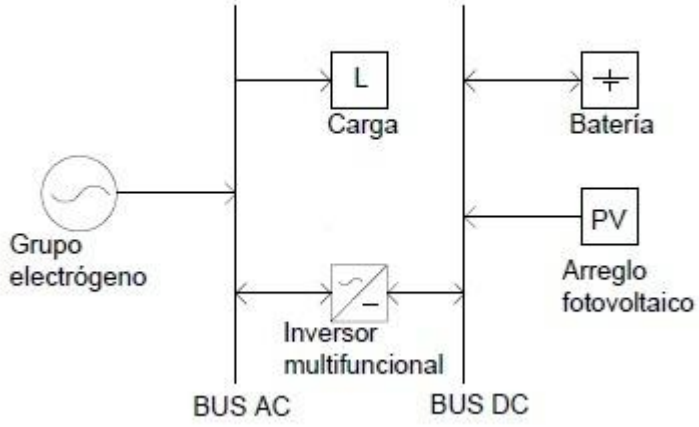


Figura 2.2: Diagrama eléctrico de un sistema híbrido PV-MCI-Batería.

2.2 Componentes de un sistema híbrido PV-MCI-Batería

Un sistema híbrido se compone de distintos elementos, los cuales en su conjunto son capaces de llevar a cabo el control, la gestión y la generación de la energía. Los elementos constituyentes de un sistema híbrido PV-MCI-Batería, y sus características, se muestran a continuación.

2.2.1 Arreglo fotovoltaico

Un arreglo fotovoltaico está compuesto por uno o más paneles (o módulos) fotovoltaicos conectados eléctricamente entre sí en serie y/o paralelo. A su vez, cada panel fotovoltaico está compuesto por varias celdas fotovoltaicas hechas de un material semiconductor, comúnmente silicio, conectadas entre sí en serie y/o paralelo. Al ser expuestas a la radiación solar, las celdas fotovoltaicas transforman la energía solar en energía eléctrica.

La Figura 2.3 muestra la curva I-V característica de una celda fotovoltaica, la cual relaciona la corriente con el voltaje entregado por una celda, para un cierto valor de irradiancia y de temperatura de la celda. Cuando se cierra el circuito en una celda, es decir, se hace un cortocircuito, se obtiene el máximo valor de corriente (corriente de cortocircuito, I_{sc}) y el voltaje a través de la celda es cero. Cuando el circuito en una celda está abierto, el voltaje es máximo (voltaje de circuito abierto, V_{oc}) y la corriente es cero. Al conectar una pequeña resistencia en los terminales de la celda, ésta trabaja en la región AB de la curva, donde la corriente es casi constante y cercana a la corriente de corto circuito. Por otro lado, si se conecta una gran resistencia, la celda trabaja en la región DE de la curva, donde el voltaje es casi constante y cercano al voltaje de circuito abierto [2].

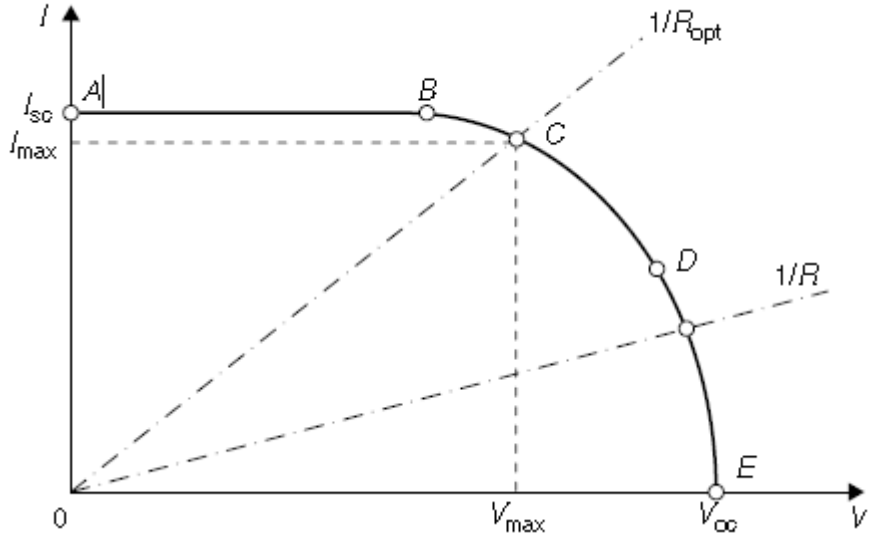


Figura 2.3: Curva I-V de una celda fotovoltaica. [2]

La Figura 2.4 muestra la potencia eléctrica, que se obtiene al multiplicar la corriente por el voltaje. La máxima potencia (P_{max}) se obtiene para un valor específico de voltaje (V_{max}) y corriente (I_{max}) [2].

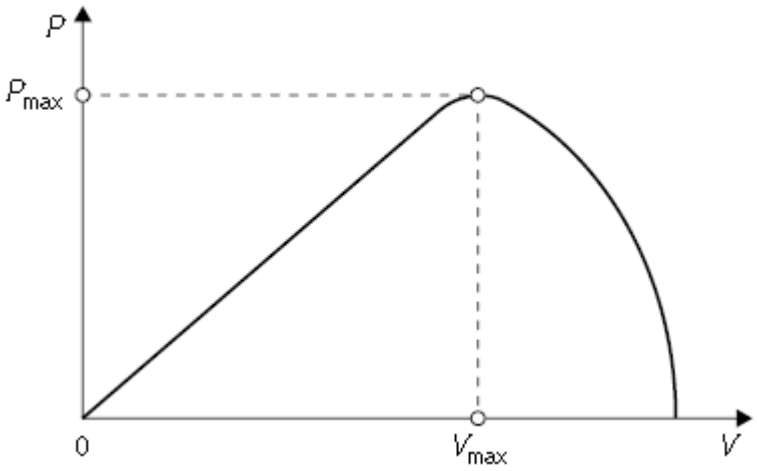


Figura 2.4: Curva P-V de una celda fotovoltaica [2]

Existen tres tipos de celda que son comúnmente utilizadas: celdas de silicio monocristalino, celdas de silicio policristalino y celdas de silicio amorfo (capa fina). La Tabla 2.1 muestra las ventajas y desventajas relativas de cada una de ellas [2].

Tabla 2.1: Ventajas y desventajas de distintos tipos de celdas fotovoltaicas [2].

Tipo de celda	**Ventajas**	**Desventajas**
Silicio monocristalino	Alta eficiencia, cercana a 15%	Fabricación complicada, lo que implica un alto costo.
Silicio policristalino	Manufactura más simple que la anterior, lo que implica un costo menor.	Eficiencia más baja que la anterior.
Silicio amorfo	Su estructura flexible permite una mayor variedad de usos.	Baja eficiencia y módulos de bajas potencias..

La energía que puede entregar un arreglo fotovoltaico en un determinado período de tiempo está directamente relacionada con el área efectiva de captación solar del arreglo, la eficiencia de las celdas fotovoltaicas y la irradiancia solar global sobre los módulos fotovoltaicos. La siguiente ecuación permite calcular la energía que entrega un arreglo fotovoltaico [2]:

$$E = I * A * \eta \tag{1}$$

Donde,

- E es la energía que entrega el arreglo fotovoltaico en un determinado tiempo, se puede medir en kWh.
- I es la irradiancia solar global en un determinado tiempo que incide sobre el arreglo fotovoltaico, generalmente se mide en [kWh/m^2].
- A es el área efectiva de captación solar del arreglo fotovoltaico, habitualmente se mide en [m^2].
- η es la eficiencia de transformación de energía de los módulos fotovoltaicos.

A su vez, la potencia instantánea que entrega un arreglo fotovoltaico se puede calcular de forma similar pero utilizando la radiación solar global en lugar la irradiancia. La siguiente ecuación permite calcular la potencia entregada [2]:

$$P = R * A * \eta \tag{2}$$

Donde,

- P es la potencia instantánea entregada por el arreglo fotovoltaico, se mide generalmente en kW.
- R es la radiación solar global que incide sobre el arreglo fotovoltaico, se mide habitualmente en [kW/m^2].

2.2.2 Grupo electrógeno

Un grupo electrógeno es una máquina capaz de producir energía eléctrica a partir de energía termoquímica proveniente de un combustible. Los dos componentes elementales de un grupo electrógeno son el motor de combustión interna y el generador. El motor de combustión interna transforma la energía química proveniente de un combustible, generalmente combustible Diesel o gasolina, en energía mecánica al hacer rotar un eje, luego, este movimiento rotatorio del eje se transforma en energía eléctrica gracias al generador.

La eficiencia del grupo electrógeno se entiende como la razón entre la potencia de salida al alimentar una carga y la potencia de entrada contenida en el combustible. La mayor eficiencia de un grupo electrógeno se obtiene al trabajar en un punto cercano al nominal. Cuando el grupo electrógeno opera con un bajo factor de carga, la eficiencia disminuye considerablemente lo que implica un aumento en el consumo de combustible por unidad de energía generada. La Figura 2.5 muestra el incremento en el consumo de combustible, con respecto al funcionamiento en el punto nominal, para distintos factores de carga y diferentes tamaños de grupos electrógenos [3].

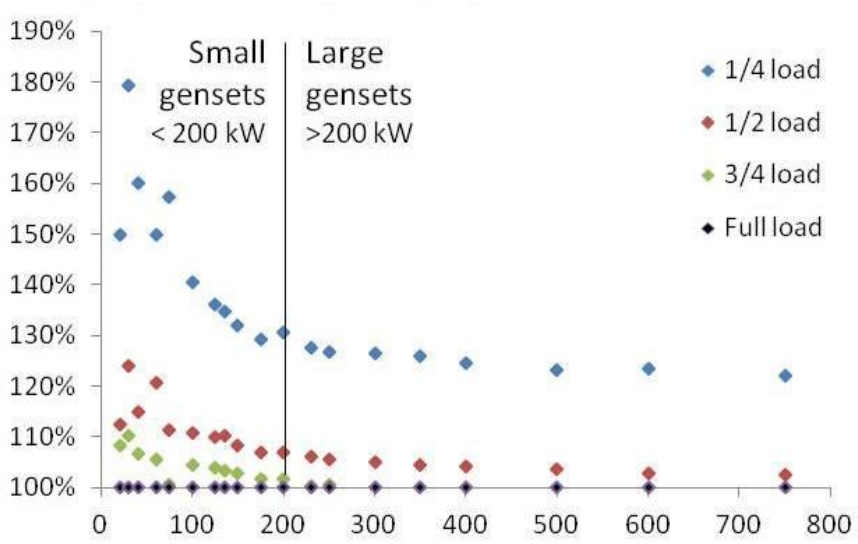


Figura 2.5: Incremento en el consumo de combustible vs potencia nominal del generador para distintos porcentajes de carga [3].

La Figura 2.6 muestra cómo se distribuyen las potencias de salida y de entrada en un motor. [19]. Se puede observar que la potencia de entrada al cilindro proviene exclusivamente del combustible introducido, mientras que las potencias de salida son producto del roce mecánico, radiación térmica, refrigeración, gases de escape, combustión y la potencia efectiva desarrollada en el cigüeñal.

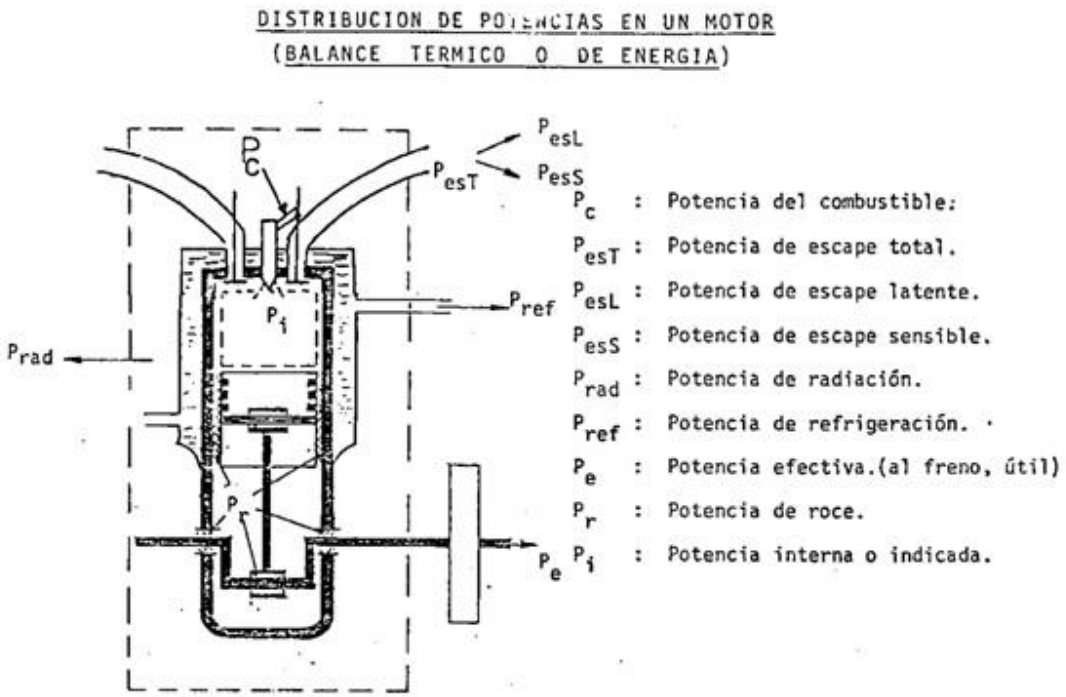


Figura 2.6: Distribución de potencias en un motor de combustión interna [19].

2.2.3 Banco de baterías

Un banco de baterías está formado por una o más baterías electroquímicas capaces de obtener energía eléctrica a partir de una reacción química y viceversa, de esta forma, el banco de baterías almacena energía eléctrica, proveniente de una fuente externa, en forma química y la devuelve en forma de energía eléctrica cuando se requiere.

Los principales tipos de baterías disponibles son las de plomo-ácido, níquel-cadmio, níquel-hidruro metálico e ion-litio. Las más usadas en aplicaciones solares son las de plomo-ácido de ciclo profundo, que tienen la ventaja de tolerar muchos ciclos de carga y descarga y además poder ser descargadas profundamente. Dentro de las baterías de plomo-ácido de ciclo profundo se pueden distinguir dos categorías [4]:

- VLA (Ventead Lead-Acid): También conocida como batería abierta, ventilada, húmeda o “flooded”. En este tipo de baterías el electrolito se encuentra en estado líquido. Se requiere cierta mantención.

- VRLA (Valve Regulated Lead Acid): También conocida como batería cerrada o regulada por válvula. Estas baterías son herméticas y no requieren mantención. Existen dos tipos de baterías VRLA:

  - AGM (Absorvent Glass Mat): En este tipo de baterías el electrolito se absorbe por capilaridad en una manta de fibra de vidrio situada entre las placas de plomo. Las baterías AGM pueden suministrar corrientes muy elevadas durante cortos periodos de tiempo.

  - Gel: En estas baterías el electrolito se inmoviliza en forma de gel. Tienen la ventaja de tener una mayor vida útil que las baterías AGM.

Las dos características principales que definen una batería son el voltaje nominal y la capacidad nominal. El voltaje nominal suele ser 12 V para baterías de plomo-ácido de ciclo profundo. Si se requiere un voltaje mayor, la práctica habitual es conectar baterías en serie para así obtener 24 V, 48 V o más. La capacidad nominal se refiere a la cantidad de carga eléctrica que puede almacenar o entregar una batería y se mide en Ampere-hora (Ah). [4]

Cuando se utilizan baterías en aplicaciones solares, se puede determinar el número de baterías que tendrá el banco mediante la siguiente relación [2]:

$$N = \frac{E}{C * V} \tag{3}$$

Donde,

- *N* es el número de baterías conectadas en serie que tendrá el banco.
- *E* es la energía que se desea suministrar durante un cierto periodo de tiempo.
- *C* es la capacidad nominal de cada batería.
- *V* es la tensión nominal de cada batería.

2.2.4 Inversor

Un inversor es un equipo electrónico que cumple la función de transformar corriente continua (DC) en corriente alterna (AC). Además existen los inversores mutifuncionales, también conocidos como inversor-cargador o inversores multipuerto, los que aparte de cumplir la función de inversor, también tienen incorporada la función de rectificador (convertir tensión AC en DC), controlador de carga y "peak-power tracker". Estas dos últimas funciones se explican a continuación:

- Controlador de carga: Es un equipo que previene la sobrecarga y sobredescarga de las baterías, de esta forma aumenta la vida útil de éstas. Al trabajar en un sistema fotovoltaico, el controlador de carga conecta o desconecta los paneles fotovoltaicos cuando la tensión sobrepasa un cierto límite inferior o superior.

- "Peak-power tracker": Es un equipo que optimiza el funcionamiento del arreglo fotovoltaico para así extraer la máxima potencia disponible. Las tecnologías existentes son dos: "Pulse Width Modulation" (PWM) y "Maximum Peak Power Tracking" (MPPT). La primera es una solución de bajo costo para sistemas pequeños y la segunda es más sofisticada y eficiente, pero más costosa [5].

Los inversores multifuncionales también pueden funcionar en paralelo con grupos electrógenos y conectarse a la red. Además, al traer incorporado un software, pueden gestionar el uso de la energía proveniente de las distintas fuentes según cómo lo programe el usuario.

2.3 Estado del arte

Hoy en día se pueden encontrar bastantes trabajos relacionados con la optimización en el diseño y la operación de sistemas híbridos. Esta tarea de optimización se divide en dos grandes áreas: dimensionamiento de los componentes del sistema (que determina finalmente cuánta energía se tendría disponible para alimentar las cargas) y la estrategia de control o despacho de energía (que determina cómo se entrega la energía) [6]. Además, algunos trabajos también estudian aspectos económicos. La mayoría de estos trabajos se relacionan con sistemas híbridos solar - diesel, eólico – diesel, o solar – eólico – diesel (principalmente diesel por su uso más común para grandes potencias que la gasolina) con almacenamiento de energía en bancos de baterías.

Para llevar a cabo la tarea de optimización, la mayoría de los trabajos realizan modelos de sistemas híbridos apoyándose en programas de diseño, como HOMER (hybrid optimization model for electric renewables), y herramientas matemáticas, como algoritmos genéticos [7]. Los resultados de estos modelos muestran que un sistema híbrido puede ser completamente factible tanto económica como técnicamente. Se observa en la literatura que un sistema híbrido puede disminuir considerablemente los costos de operación al compararlo con un sistema que utilice solo grupos electrógenos (además se disminuye la emisión de contaminantes atmosféricos) y se puede disminuir en gran magnitud el tamaño del banco de baterías al compararlo con un sistema que utilice solo energía fotovoltaica con sistema de almacenamiento [8–11].

A pesar de la valiosa información que puede entregar la modelación de un sistema híbrido, todos los trabajos anteriormente descritos son solamente aproximaciones de la realidad, no existiendo sistemas híbridos implementados que validen las modelaciones. No se encuentra en la literatura muchos trabajos que documenten el desempeño de sistemas híbridos instalados y en funcionamiento [6]. Nayar y otros construyeron y probaron un sistema híbrido solar – diésel con almacenamiento en baterías que demuestra su capacidad para proveer energía ininterrumpidamente [12]. En Bo, Sierra Leona, se modeló un sistema híbrido solar –

Diésel – batería para entregar energía al hospital Mercy [6]. El resultado de la modelación muestra que se puede lograr una gran disminución de los costos de operación al compararlo con un sistema que utilice solo grupos electrógenos. Este sistema híbrido se pretende implementar en el hospital para evaluar su desempeño y contrastarlo con el modelo.

En lo que respecta a la aplicación directa de un sistema híbrido para satisfacer la demanda de energía de una comunidad, ciudad, edificios públicos o privados, etc., se pueden encontrar varios sistemas instalados en distintas partes del mundo. Uno de los lugares donde más se han gestado proyectos relacionados con sistemas híbridos son las zonas remotas, donde no existe red eléctrica y el costo de los combustibles se eleva drásticamente debido a la lejanía con asentamientos urbanos [13]. A continuación se muestran algunos ejemplos de instalaciones híbridas solar – Diésel en Chile y el extranjero.

En 2008 se instaló un sistema híbrido solar-Diésel-baterías cerca Mwanza, Tanzania, en un centro de formación para la siembra, carpintería y albañilería. El sistema híbrido se compone de un arreglo fotovoltaico de 655 Wp, un grupo electrógeno de 12 kW (una de las tres fases es conectada al sistema híbrido), un banco de cinco baterías de 12 V/200 Ah del tipo VRLA, un inversor bidireccional de 1500 W de potencia máxima de salida, un controlador de carga y un estabilizador de voltaje. El sistema de distribución es dividido en secciones AC y DC. La sección DC es usada para iluminación de seguridad durante la noche. La sección AC es utilizada para alimentar cargas durante el día, de una potencia promedio de 150 W y peaks de alrededor de 500 W. La energía total entregada está entre 1,5 kWh y 2 kWh al día durante los días de semana [3].

En 2011 se implementó una planta de potencia híbrida para abastecer la ciudad de Quelessbougou, Mali. El proyecto consistía en la hibridación de la existente planta Diesel (2x275 kVA, 400 kW de potencia peak) con un arreglo fotovoltaico de 216 kWp y un banco de baterías de 1600 kWh. Además cuenta con tres inversores de 220 kVA cada uno. La planta abastece a cerca de 500 hogares. La hibridación permite que el generador permanezca apagado durante el día y reduce su uso en un 75% del tiempo [3].

Desde 2014 se está instalando un sistema híbrido PV-MCI para abastecer las estaciones de válvulas de un nuevo mineroducto de Minera Escondida, Chile. El sistema híbrido se compone de dos sistemas fotovoltaicos -el primero está conformado por tres arreglos fotovoltaicos de 5 paneles de 150 Wp y 24 Vcc conectados en serie, mientras el segundo está compuesto por tres arreglos fotovoltaicos de 12 paneles de 150 Wp y 24 Vcc en paralelo-, un grupo electrógeno de 70 kVA, dos bancos de baterías de 1200 Ah, dos inversores 120 Vcc/380 Vca, dos inversores 24 Vcc/220 Vca y dos cargadores de baterías. Ambos sistemas fotovoltaicos están diseñados para recuperar toda la energía consumida durante las 24 horas del día, manteniendo una reserva de 5 días de operación sin volver a cargar las baterías. En caso de falla o un aumento del consumo sobre lo diseñado, descargando las baterías sobre el umbral de operación, el generador de respaldo entrará en funcionamiento para alimentar a los equipos en operación y cargar las baterías [14].

3 Diseño e implementación

En este capítulo se muestran los componentes ofertados en el mercado y los elementos seleccionados para conformar el sistema. Posteriormente se especifica cada equipo que constituye el sistema implementado y por último se presentan los equipos auxiliares que sirven para mostrar su funcionamiento.

El lugar de emplazamiento del sistema es el Laboratorio de Energías Renovables de la Sede José Miguel Carrera de la Universidad Técnica Federico Santa María, ubicado en la ciudad de Viña del Mar, Chile. Las coordenadas específicas del lugar son 33°02'23" Sur, 71°29'09" Oeste. La Figura 3.1, obtenida de Google Maps, muestra la ubicación del LER.

Figura 3.1: Ubicación geográfica del LER.

3.1 Componentes ofertados en el mercado

Diversos componentes para diseñar un sistema híbrido PV-MCI-Batería se pueden encontrar en el mercado nacional como internacional. A continuación se muestran los componentes ofertados y los seleccionados para conformar el sistema implementado.

3.1.1 Inversor

En el mercado internacional se pueden encontrar diversos inversores multifuncionales, comenzando con equipos de un kVA de potencia máxima de salida hasta decenas de kVA. El voltaje de entrada de la batería puede ser 12, 24 o 48 Vcc. El voltaje AC de entrada típicamente es 110 o 220 V. La Figura 3.2 a) muestra un inversor marca SMA de 25 kVA, en la Figura 3.2 b) se puede observar un inversor marca Victron de 3 kVA, la Figura 3.2 c) muestra un inversor marca Voltronic de 5 kVA.

Figura 3.2: Tipos de inversores ofertados en el mercado.

La Tabla 3.1 muestra las características técnicas de los equipos mencionados.

Tabla 3.1: Características técnicas de tres diferentes inversores multifuncionales ofrecidos en el mercado [21–23].

Marca	SMA	Victron	Voltronic
Modelo	Sunny Tripower	Multiplus	Axpert MKS
Potencia nominal	25 kVA	3 kVA	5 kVA
Tensión AC entrada	230 V	187 - 265 V	230 V
Tensión DC entrada	1000 V max.	48 V	48 V
Eficiencia	98%	95%	93%
Dimensiones	661x682x264 mm	362x258x218 mm	120x295x468 mm
Peso	61 kg	18 kg	11 kg
Rango de temperatura de trabajo	-25 a 60 °C	-40 a 65°C	0 a 55 °C
Humedad relativa máxima permisible	100%	95%	95%

3.1.2 Grupo electrógeno

Se pueden encontrar diversos grupos electrógenos en el mercado nacional como internacional. Variados fabricantes y proveedores ofrecen sus productos de diferentes características. Se pueden encontrar grupos electrógenos de potencia de salida inferior a un kVA hasta miles de kVA. Los posibles combustibles para su funcionamiento son gasolina, diésel o gas natural. El motor de combustión interna puede ser de 2 o 4 tiempos. La corriente entregada puede ser monofásica o trifásica. La Figura 3.3 a) muestra un grupo electrógeno marca PowerPro de 0,8 kVA con motor a gasolina, en la Figura 3.3 b) se puede observar un grupo electrógeno de la misma marca que el anterior de 2,5 kVA con motor a gas natural, la Figura 3.3 c) muestra un generador marca Lureye de 250 kVA con motor diésel.

Se puede observar que los grupos electrógenos de bajas potencias, como el mostrado en la Figura 3.3 a) no poseen un sistema de partida automática, por lo tanto, al utilizarse en un sistema híbrido PV-MCI-Batería, se debe tener en consideración la permanente presencia de un operario para hacer funcionar este equipo.

a)

b)

c)

Figura 3.3: Tipos de grupos electrógenos ofertados en el mercado.

La Tabla 3.2muestra las características técnicas de los equipos mencionados.

Tabla 3.2: Características técnicas de tres grupos electrógenos encontrados en el mercado [24-26].

Marca	Powerpro	Powerpro	Lureye Motor: John Deere Alternador: Leroy Somer
Modelo	GE1000	DG2500	Motor: 6081HF001 Alternador: LSA462L6
Potencia continua	0,65 KVA	2,5 KVA	250 KVA
Voltaje	220 V	230 V	220 V
Frecuencia	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Fase	Monofásico	Monofásico	Trifásico
Sistema de partida	Manual	Eléctrico / Manual	Eléctrico
Tipo de motor	Monocilíndrico 2T	Monocilíndrico 4T	Cilindros en línea, 4T
Combustible	Gasolina	GN / GLP	Diesel
Capacidad estanque combustible	4 L	No aplica	950 L
Refrigeración	Por aire	Por aire	Radiador

3.1.3 Paneles fotovoltaicos

Existen diversos proveedores de paneles solares a lo largo del territorio nacional, de distintos tipos y diferentes parámetros. El tipo de panel comúnmente puede ser de silicio monocristalino, silicio policristalino o silicio amorfo, con una potencia peak aproximadamente entre 20 a 300 Wp. En la Figura 3.4 a) se puede observar un panel fotovoltaico monocristalino de 150 Wp, la Figura 3.4 b) muestra un panel fotovoltaico policristalino de 250 Wp, en la Figura 3.4 c) se puede observar un panel fotovoltaico amorfo de 20 Wp.

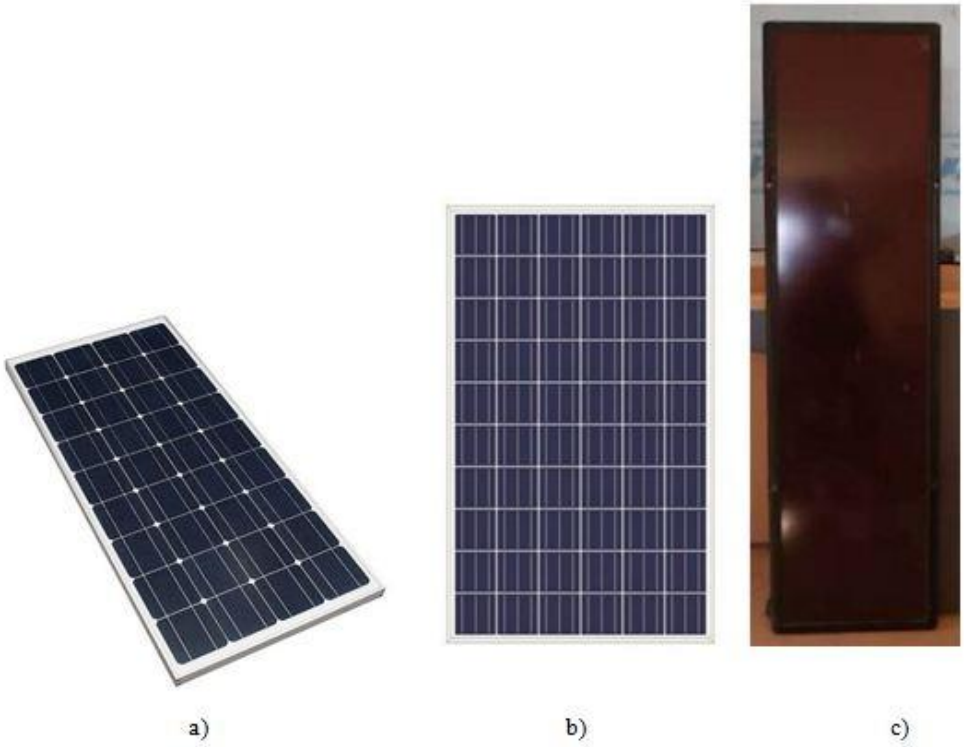


Figura 3.4: Tipos de paneles fotovoltaicos ofertados en el mercado.

La Tabla 3.3 muestra las características técnicas de los equipos mencionados.

Tabla 3.3: Características técnicas de tres módulos fotovoltaicos de diferente tipo de celda [27-29].

Tipo de celda	Silicio monocristalino	Silicio policristalino	Silicio amorfo
Potencia peak	150 Wp	250 Wp	20 Wp
Corriente de corto circuito	8,53 A	8,83 A	1,23 A
Tensión de circuito abierto	22,4 V	37,4 V	20,8 V
Eficiencia	15,0%	15,4%	20,4%
Dimensiones	1480x675x35 mm	1640x992x40 mm	310x530x3 mm
Peso	12 kg	19 kg	0,6 kg

3.1.4 Batería

Tal como se expone en el capítulo 2, las baterías comúnmente usadas en aplicaciones solares son las de plomo-ácido de ciclo profundo. Típicamente se encuentran baterías de 12 V con una capacidad desde decenas de Ah hasta miles de Ah. La Figura 3.5 a) muestra una batería de 12 V y 15 Ah, la Figura 3.5 b) muestra una batería de 12 V y 100 Ah.

Figura 3.5: Tipos de baterías ofertadas en el mercado.

La Tabla 3.4 muestra las características técnicas de los equipos mencionados.

Tabla 3.4: Características técnicas de dos baterías de diferente capacidad nominal [30-31].

Marca	Curtiss	Ultracell
Modelo	CT 12 150	UC100-12
Tipo	Batería de plomo de ciclo profundo	Batería de plomo de ciclo profundo
Voltaje nominal	12 V	12 V
Capacidad nominal	15 Ah	100 Ah
Terminal	T2	F11
Corriente de descarga máxima	No informado	1200 A (5s)
Peso	4,2 Kg	30,4 Kg

3.2 Características de los equipos seleccionados

A continuación se muestran las principales características de los equipos que constituyen el sistema híbrido PV-MCI-Batería implementado.

3.2.1 Inversor

Se planteó como objetivo lograr una potencia de salida de 1 [kVA] con el sistema a instalar, por este motivo se selecciono el inversor de la Figura 3.6. El catálogo del producto con información más detallada se puede encontrar en Anexo A.

La Tabla 3.5 muestra las características técnicas de este equipo.

Tabla 3.5: Características técnicas del inversor multifuncional seleccionado [1].

Marca	Mpp Solar
Modelo	PIP 812 HS
Potencia nominal de salida	1 [kVA
Tensión AC nominal de entrada	230 [V]
Tensión AC máxima de entrad	300 [V]
Frecuencia	50/60 Hz
Forma de onda	Sinusoidal pura
Eficiencia	95% (line mode) / 91% (inverter mode)
Tensión de salida	230 [V] ± 5%
Tensión DC batería	12 [V]
Tipo cargador solar	PWM, 50 [A] max.
Rango de temperatura de operación	0 a 55 °C
Humedad relativa máxima permisible	90%
Dimensiones	316x240x95 mm
Peso	5 kg

Figura 3.6: Inversor multifuncional seleccionado.

3.2.2 Grupo electrógeno

En base a la potencia máxima de salida del inversor elegido, se seleccionó un grupo electrógeno de 650 VA de potencia nominal. La Figura 3.7 muestra el grupo electrógeno adquirido.

La Tabla 3.6 muestra las características técnicas de este equipo.

Tabla 3.6: Características técnicas del grupo electrógeno seleccionado [32].

Marca	Einhell
Modelo	BT-PG 850
Potencia continua	650 [VA]
Potencia máxima	720 [VA] (15 min)
Tensión nominal	230 [V]
Corriente nominal	2,8 [A]
Frecuencia	50 [Hz]
Generador	Síncrono
Tipo de motor	2 tiempos
Refrigeración	Por aire
Combustible	Mezcla (Gasolina-aceite)
Razón mezcla	1:40
Cilindrada	63 cm^3
Volumen del estanque	4,2 [L]
Consumo en carga de 3/4	0,7 [L/h]
Peso	18,5 kg
Nivel de presión acústica L_p	70 dB
Bujía de encendido	NGK BPR5ES

Figura 3.7: Grupo electrógeno seleccionado.

3.2.3 Arreglo fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos utilizados en este trabajo son los disponibles en el LER, los cuales son tres panales de silicio monocristalinos de 100 Wp cada uno. La Figura 3.8 muestra los paneles fotovoltaicos utilizados.

Cabe destacar que uno de los tres paneles no se encontraba en óptimas condiciones de funcionamiento debido a grandes manchas negras en sus celdas fotovoltaicas. Este defecto es producido por la falla del encapsulante de etileno vinil acetato (EVA) o la lámina de fluoruro de polivinilo (FPV). Estas láminas tienen como objetivo evitar la entrada de aire o humedad y proteger las celdas fotovoltaicas de los efectos degradantes de la radiación ultravioleta. [17] El panel aludido es el primero de izquierda a derecha que aparece en la Figura 3.8. En la Figura 3.9 se puede observar con mayor detalle este defecto.

La Tabla 3.7 muestra las características técnicas de este equipo.

Tabla 3.7: Características técnicas del arreglo fotovoltaico utilizado.

Cantidad de paneles	3
Conexión:	Paralelo
Marca paneles:	Siemens
Potencia peak:	100 [Wp] c/u
Corriente de cortocircuito (por panel)	3,26 [A]
Tensión de circuito abierto (por panel)	20 [V]
Área efectiva	0,76 [m^2] c/u
Angulo de inclinación:	35°

Figura 3.8: Paneles fotovoltaicos seleccionados.

Figura 3.9: Detalle de panel fotovoltaico defectuoso.

3.2.4 Banco de baterías

Para este trabajo se seleccionó una batería de plomo-ácido de ciclo profundo VRLA-AGM de 12 V y 100 Ah, recomendada por el fabricante del inversor multifuncional, como se muestra en la Figura 3.10. La Figura 3.11 muestra la batería seleccionada.

Model	Typical Amperage	Battery capacity	Wire Size	Ring Terminal			Torque value
				Cable mm^2	Dimensions		
					D (mm)	L (mm)	
1KVA/2KVA	66A	100AH	1*6AWG	14	6.4	29.2	2~ 3 Nm
			2*10AWG	8	6.4	23.8	
3KVA	100A	100AH 200AH	1*4AWG	22	6.4	33.2	2~ 3 Nm
			2*8AWG	14	6.4	29.2	
4KVA	67A	200AH	1*4AWG	22	6.4	33.2	2~ 3 Nm
			2*8AWG	14	6.4	29.2	
5KVA	84A	200AH	1*4AWG	22	6.4	33.2	2~ 3 Nm
			2*8AWG	14	6.4	29.2	

Figura 3.10: Recomendaciones técnicas para la instalación de la batería según el fabricante del inversor multifuncional [1].

La Tabla 3.8: Características técnicas del banco de baterías utilizado [33]. muestra las características técnicas de este equipo.

Tabla 3.8: Características técnicas del banco de baterías utilizado [33].

Cantidad de baterías	1
Marca	Curtiss
Modelo	CT 12 1000
Tipo	Batería de plomo de ciclo profundo VRLA-AGM
Tensión nominal	12 [V]
Capacidad	100 [Ah]
Terminal	T19
Dimensiones	213x331x173 mm
Peso	31 kg

Figura 3.11: Batería seleccionada.

En la Figura 3.12 se puede observar el sistema completo. En primer plano se observa parte del arreglo fotovoltaico, al fondo se puede observar el grupo electrógeno, la batería y el inversor.

Figura 3.12: Sistema híbrido completo.

En la Figura 3.13 se puede apreciar el grupo electrógeno, la batería y algunas ampolletas que están siendo alimentadas por el sistema híbrido.

Figura 3.13: Grupo electrógeno, batería y carga aplicada al sistema.

3.3 Equipos auxiliares

Para realizar mediciones sobre el sistema implementado y poder observar en forma práctica el funcionamiento de éste, se requieren ciertos equipos auxiliares, los cuales se describen a continuación.

3.3.1 Juego de cargas

Para introducir carga al sistema, se utiliza un tablero con ocho soquetes conectados en paralelo para conectar ampolletas incandescentes, como la mostrada en la Figura 3.15, de distintas potencias. La Figura 3.14 muestra este juego de cargas.

Figura 3.14: Juego de cargas.

Figura 3.15: Ampolleta incandescente.

3.3.2 Equipos de medición

Para medir las distintas variables eléctricas en el sistema, se utiliza el software WatchPower provisto por el proveedor del inversor. La Figura 3.16 muestra la ventana principal de la

interfaz de usuario del software. Se pueden observar las distintas variables que entrega y un esquema interactivo que muestra, en tiempo real, el funcionamiento de los distintos equipos.

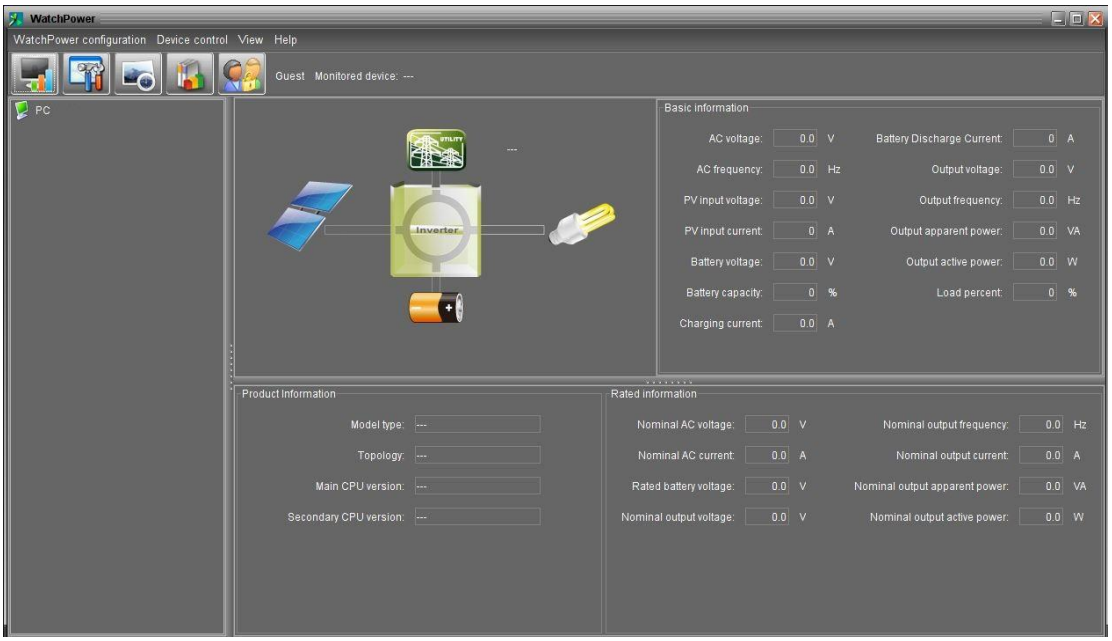


Figura 3.16: Ventana principal de la interfaz de usuario del software WatchPower [15].

Para el registro de la irradiancia solar se utiliza un piranómetro marca Kipp & Zonen, modelo SP Lite, con una sensibilidad de 73,7 $\mu V/Wm^{-2}$, conectado a un “data logger” marca Tinnytag. La Figura 3.17 muestra el piranómetro utilizado, la Figura 3.18 muestra el data logger utilizado.

Figura 3.17: Piranómetro utilizado.

Figura 3.18: "Data logger" utilizado.

4 Manual de uso

4.1 Conexión de los equipos

El primer paso para utilizar el sistema híbrido PV-MCI-Batería implementado es conectar todos los equipos. El inversor multifuncional es el principal equipo del sistema, pues todos los otros equipos van conectados a éste y desde el inversor se despacha la energía que alimentará las cargas. El grupo electrógeno debe ser conectado a la entrada “AC input” del inversor, el arreglo fotovoltaico se conecta a la entrada “PV input”, la batería debe ser conectada a la entrada “DC input”, las cargas que serán alimentadas por el sistema se conectan a la salida “AC output”. El puerto RS232 sirve para comunicar el inversor con un computador. Se debe quitar la tapa inferior del inversor para poder realizar las conexiones, tal como se muestra en la Figura 4.1. En la Figura 4.2 se muestra dónde van conectados los equipos. La Figura 4.3 muestra los equipos ya conectados.

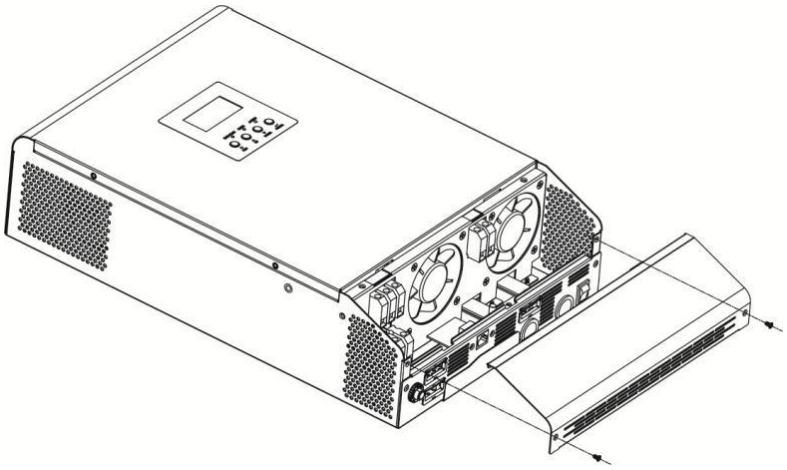


Figura 4.1: Tapa inferior del inversor removida [1].

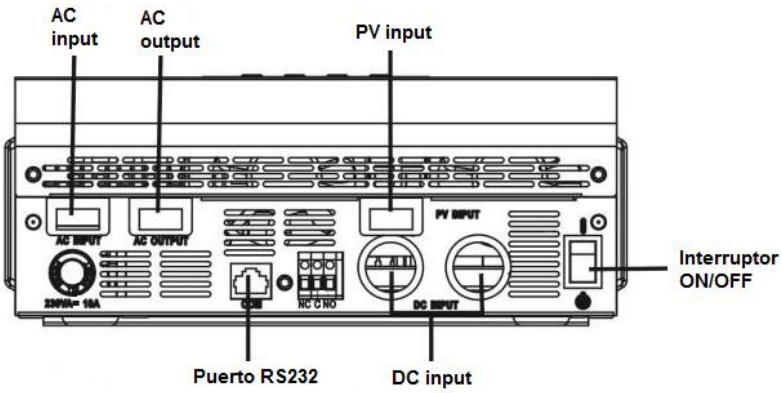


Figura 4.2: Esquema de conexión de los equipos [1].

Figura 4.3: Conexiones hechas en el inversor.

4.2 Operación del sistema

Una vez que están todos los equipos conectados, se debe presionar el interruptor ON/OFF del inversor para encender el sistema.

El inversor posee una pantalla LCD donde se puede observar información sobre los equipos conectados y el estado de operación del sistema, además se pueden hacer múltiples configuraciones utilizando los botones ubicados debajo de la pantalla. Sin embrago, gracias al software WatchPower, se pueden realizar las mismas funciones pero de manera más didáctica. El funcionamiento del software se explica más abajo en este capítulo. La Figura 4.4 muestra la pantalla y los botones mencionados.

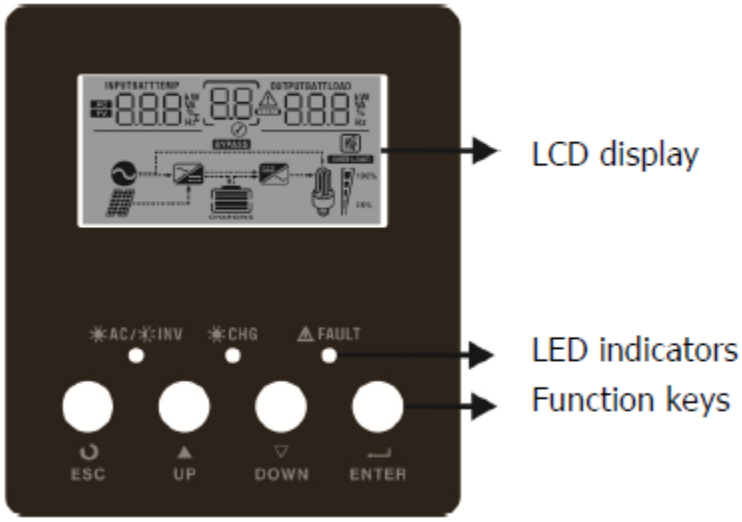


Figura 4.4: Pantalla LCD del inversor [1].

4.2.1 Modos de operación

Diversos modos de operación ofrece el sistema híbrido PV-MCI-Batería, ya sea alimentando cargas o solo cargando las baterías, usando una o más fuentes de energía. En la Tabla 4.1,

Tabla 4.2, Tabla 4.3 y Tabla 4.4 se puede observar la descripción del modo de operación “Standby Mode”, “Fault Mode”, “Line Mode” y “Battery Mode”, respectivamente.

Tabla 4.1: Descripción del modo de operación "Standby Mode" [1].

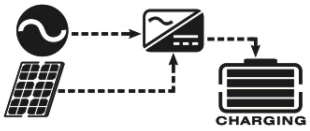
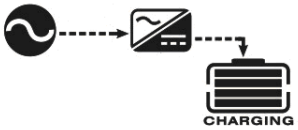
Modo de operación	**Descripción**	**Esquema**
“Standby Mode”	No hay carga siendo alimentada por el sistema, pero la batería puede ser cargada.	El arreglo fotovoltaico y el grupo electrógeno cargan la batería. 
		El grupo electrógeno carga la batería. 
		El arreglo fotovoltaico carga la batería.
		La batería no es cargada.

Tabla 4.2: Descripción del modo de operación "Fault Mode" [1].

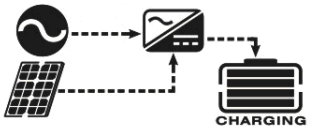
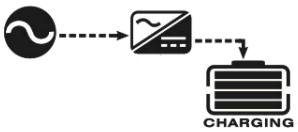
Modo de operación	**Descripción**	**Esquema**
“Fault Mode”	Algún error en el sistema es causado por sobre temperatura, corto-circuito en la salida AC, error en el circuito interno del inversor, etc. Sin embargo, la batería podría seguir siendo cargada.	El arreglo fotovoltaico y el grupo electrógeno cargan la batería. 
		El grupo electrógeno carga la batería. 
		El arreglo fotovoltaico carga la batería.
		La batería no es cargada.

Tabla 4.3: Descripción del modo de operación "Line Mode" [1].

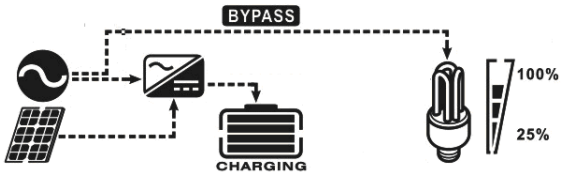
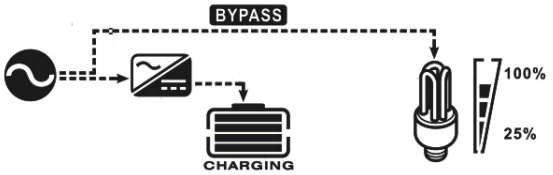
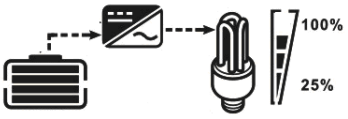
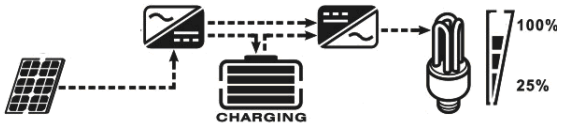
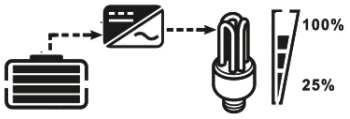
Modo de operación	**Descripción**	**Esquema**
“Line Mode”	El sistema alimenta la carga a través del grupo electrógeno. Además la batería puede ser cargada.	El grupo electrógeno y el arreglo fotovoltaico cargan la batería. 
		El grupo electrógeno carga la batería. 
		Solo la batería alimenta la carga. 

Tabla 4.4: Descripción del modo de operación "Battery Mode" [1].

Modo de operación	**Descripción**	**Esquema**
“Battery Mode”	El sistema alimenta la carga gracias al arreglo fotovoltaico y la batería.	El arreglo fotovoltaico y la batería alimentan la carga. 
		Solo la batería alimenta la carga. 

4.2.2 Configuraciones con WatchPower

WatchPower es un software que permite el monitoreo del inversor mediante comunicación serial entre un computador y el inversor a través de un cable RS232. Las principales funciones del software son el almacenamiento de datos relativas al funcionamiento del sistema, configuraciones en el sistema y mensajes de alarma y de fallas.

Antes de aplicar carga al sistema, se puede utilizar el software para visualizar o cambiar las configuraciones dadas por defecto.

Primero que todo se debe instalar el software, gracias al CD provisto por el proveedor del inversor, en un computador que cumpla los requerimientos de sistema mostrados en Anexo B.

Desde la ventana principal del software, haciendo clic en “WatchPower Configuration -> Basic”, se pueden realizar configuraciones básicas sobre el registro de datos, como se muestra en la Figura 4.5. A continuación se explican las distintas opciones de configuración:

- “Page refresh interval”: Indica cada cuánto tiempo se actualiza la ventana principal. El rango de configuración es de 1 a 55 segundos. La configuración por defecto es 2 segundos.
- “Device scan interval”: Se refiere al intervalo de escaneo de los equipos conectados. Puede variar entre 5 a 600 segundos. Por defecto está configurado en 5 segundos.
- “Record interval”: Indica cada cuánto tiempo se guardaran los datos leídos. Puede variar entre 30 a 600 segundos. La configuración por defecto es 60 segundos.
- “Date format”: Se refiere al formato de fecha. Las opciones son: “YYYY-MM-DD”, “YYYY/MM/DD”,” MM-DD-YYYY” y “MM/DD/YYYY”, donde “Y” indica año,”M” mes y “D” día.

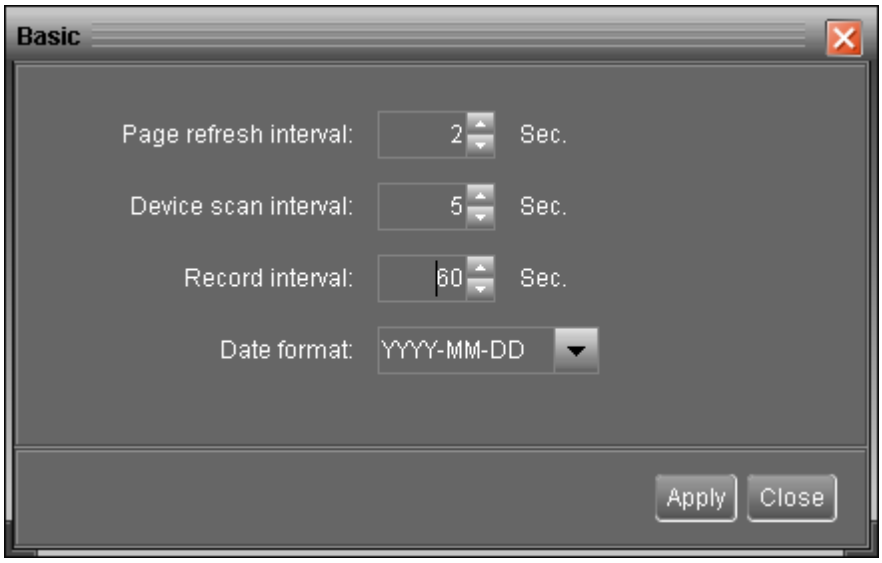


Figura 4.5: Configuraciones básicas de WatchPower [15].

Luego de realizar algún cambio, se debe presionar el botón “apply” para guardar la configuración hecha. Cabe destacar que al realizar cualquier cambio en la configuración, el software pedirá que se inicie sesión, como se muestra en la Figura 4.6, para aplicar el cambio. La contraseña por defecto para iniciar sesión es “administrator”.

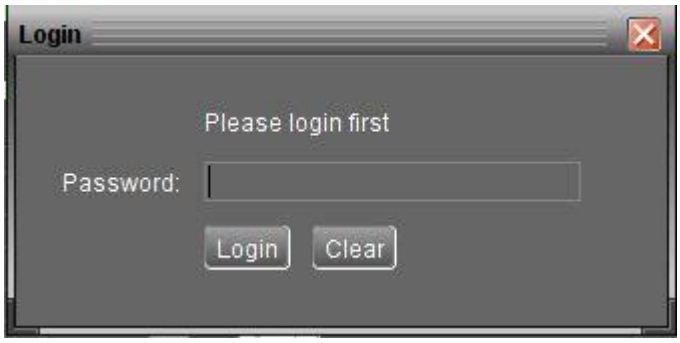


Figura 4.6: Inicio de sesión en WatchPower [15].

También desde la ventana principal, se puede acceder a las configuraciones de los distintos parámetros posibles haciendo clic en “Device Control -> Parameter Setting”. La Figura 4.7 muestra las posibles configuraciones.

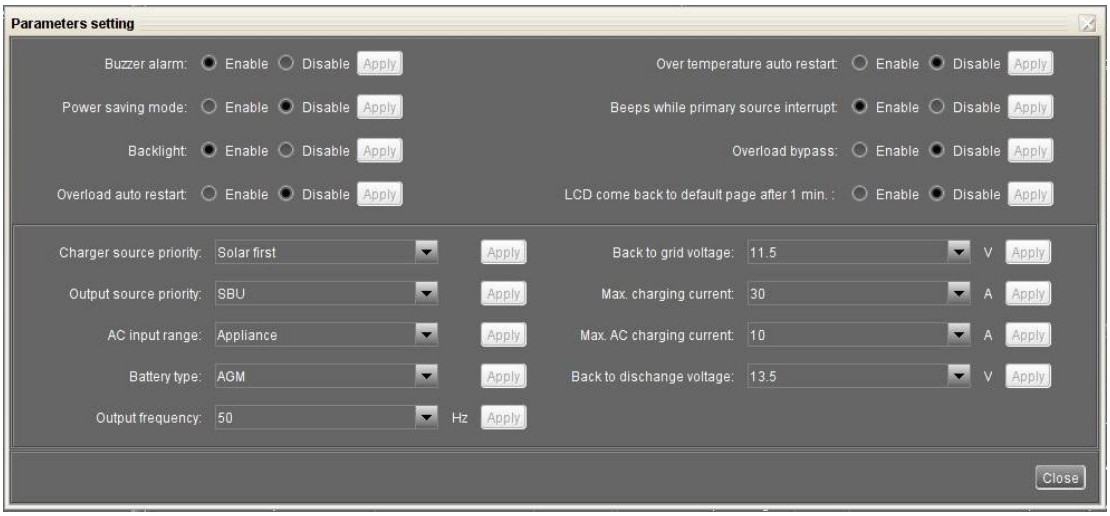


Figura 4.7: Configuraciones de distintos parámetros en WatchPower [15].

En la parte superior de la ventana de configuración, al hacer click en “Enable” o “Disable” y luego en “Apply”, se activa o desactiva, respectivamente, la configuración deseada, las cuales se refieren principalmente a alarmas y protecciones en caso de un funcionamiento anómalo del inversor. A continuación se explican estas configuraciones:

- “Buzzer alarm”: Activa o desactiva la alarma sonora cuando ocurre una falla.
- “Power saving mode”: Al activarla, apaga el inversor cuando no se detecta carga.
- “Backlight”: Al desactivarla, apaga la pantalla LCD del inversor cuando no se presiona ningún botón luego de un minuto.
- “Overload auto restart”: Al activarla, se reinicia el inversor luego de una sobrecarga.
- “Over temperature auto restart”: Al activarla, se reinicia el inversor luego de una sobre temperatura.

- “Beeps while primary source interrupt”: Al activarla, se emite una alarma si se interrumpe la fuente principal de energía.
- “Overload bypass”: Al activarla, se transfiere automáticamente a “line mode” cuando una sobrecarga ocurre en “battery mode”
- “LCD come back to default page after 1 min”: Al activarla, la pantalla LCD del inversor vuelve a la ventana principal si no se presiona ningún botón luego de un minuto.

En la parte inferior de la ventana, se pueden encontrar las distintas opciones para cada configuración. Luego de elegir la opción deseada, se debe hacer click en “Apply” para ejecutar el cambio. Estas configuraciones se refieren principalmente a la operación del sistema híbrido, las cuales se explican a continuación.

- “Charger source priority”: Se refiere a la fuente prioritaria para cargar la batería. Cuando el sistema opera en “battery mode” la energía solar es la prioritaria para cargar la batería, solo si está disponible y es suficiente. Si el sistema opera en “line mode”, “standby mode” o “fault mode”, se debe elegir una de las siguientes opciones:
    - “Solar first”: La energía solar cargará la batería como primera prioridad. El grupo electrógeno cargará la batería solo si la energía solar no está disponible.
    - “Utility first”: El grupo electrógeno cargará la batería como primera prioridad. La energía solar cargará la batería solo cuando el grupo electrógeno no esté disponible.
    - “Solar and utility”: La energía solar y el grupo electrógeno cargarán la batería al mismo tiempo.
    - “Only solar”: La energía solar será la única fuente que cargará la batería, independiente de si el grupo electrógeno está o no disponible.
- “Output source priority”: Se refiere a la fuente prioritaria para alimentar la carga. Existen tres opciones:

- “Solar first”: La energía solar alimentará la carga como primera prioridad. Si la energía solar no es suficiente para alimentar toda la carga conectada, la batería ayudará a alimentar la carga al mismo tiempo. El grupo electrógeno alimentará la carga solo cuando ocurra cualquiera de las siguientes condiciones:
    - La energía solar no está disponible.
    - El voltaje de la batería cayó a un valor inferior al configurado en el punto “Back to grid voltaje”.
- “Utility first”: El grupo electrógeno alimentará la carga como primera prioridad. La energía solar y la batería alimentarán la carga solo si el grupo electrógeno no está disponible.
- “SBU priority”: La energía solar alimentará la carga como primera prioridad. Si la energía solar no es suficiente para alimentar toda la carga conectada, la batería ayudará a alimentar la carga al mismo tiempo. El grupo electrógeno alimentará la carga solo cuando el voltaje de la batería caiga a un valor inferior al configurado en el punto “Back to grid voltaje”.

- “AC input range”: Existen dos opciones:
    - “Appliances”: El rango aceptable de voltaje AC de entrada será de 90 – 280 Vac.
    - “UPS”: El rango aceptable de voltaje AC de entrada será de 170 – 280 Vac.
- “Battery type”: Existen dos opciones, que deben ser escogidas según el tipo de batería utilizada, con el fin de optimizar el proceso de carga de éstas. Las dos opciones son:
    - AGM: Se debe escoger esta opción si se utiliza una batería del tipo VRLA.
    - Flooded: Se debe escoger esta opción si se utiliza una batería del tipo VLA.
- “Output frequency”: Se refiere a frecuencia nominal de salida. Existen dos opciones: 50 y 60 Hz.
- “Back to grid voltaje”: Si en el punto “Output source priority”, está seleccionada la opción “Solar first” o “SBU priority”, el grupo electrógeno pasará a alimentar la carga cuando el voltaje de la batería caiga a un valor inferior al seleccionado en este punto. Las opciones son: 11.0, 11.3, 11.5, 11.8, 12.0, 12.3, 12.5, y 12.8 V.

- “Max. charging current”: Se refiere a la corriente máxima que cargará la batería, proveniente del grupo electrógeno y el arreglo fotovoltaico. Las opciones son 10, 20, 30, 40 y 50 A.
- “Max. AC charging current”: Se refiere a la corriente máxima que cargará la batería proveniente del grupo electrógeno. Las opciones son: 10 y 20 A.
- “Back to dischange voltaje”: Si en el punto “Output source priority”, está seleccionada la opción “Solar first” o “SBU priority”, el sistema pasará al modo de operación “Battery mode” cuando el voltaje de la batería alcance el valor seleccionado en este punto. Las opciones son: 12.0, 12.3, 12.5, 12.8, 13.0, 13.3, 13.5, 13.8, 14.0, 14.3 y 14.5 V.

4.3 Perfiles de carga

Luego de conectar todos los equipos y realizar las configuraciones deseadas con el software WatchPower, se puede proceder a aplicar carga al sistema.

Diversos tipos de carga puede aceptar el sistema, se pueden conectar computadores, celulares, diversas luminarias, etc.

Con el juego de cargas descrito en el capítulo anterior, se pueden conectar ampolletas de distintas potencias y crear perfiles de carga que simulan perfiles residenciales, industriales, etc. A continuación se muestran distintos perfiles de carga diarios que pueden ser probados con el sistema, los cuales simulan distintos perfiles de carga reales.

La Figura 4.8 muestra un perfil de carga diario típico de una comunidad rural [3], donde se tiene una carga casi constante desde las 9 de la mañana hasta aproximadamente las 18 horas, para pasar a un peak de consumo de energía eléctrica entre las 19 y las 20 horas.

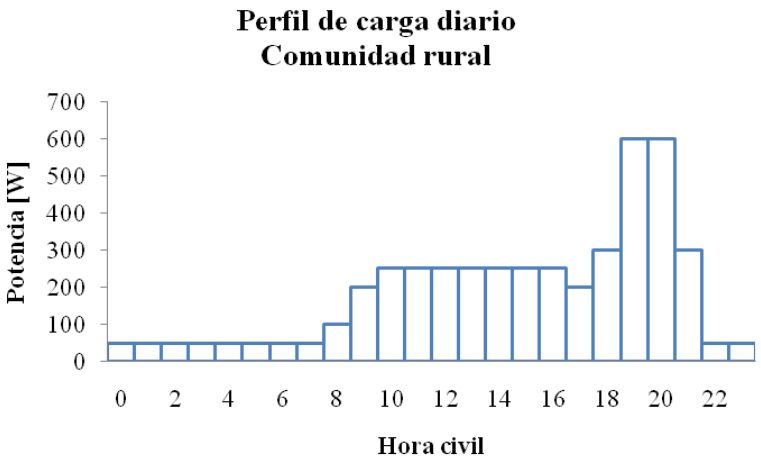


Figura 4.8: Perfil de carga diario de una comunidad rural.

En la Figura 4.9 se puede observar un perfil de carga diario típico de una escuela rural [16], donde se tiene una gran demanda energética, casi constante, desde las 8 de la mañana hasta aproximadamente las 15 horas, para luego pasar a una pequeña demanda de energía hasta las 20 horas.

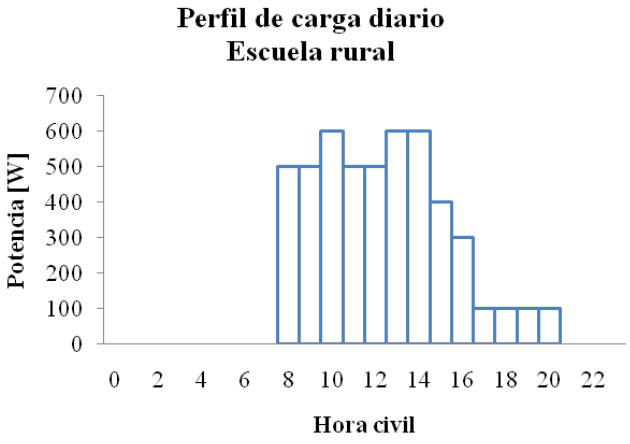


Figura 4.9: Perfil de carga diario de una escuela rural.

La Figura 4.10 muestra el perfil de carga diario de una carga constante, que puede ser semejante al perfil de carga de un proceso industrial, donde se tiene la misma demanda energética durante todo el día.

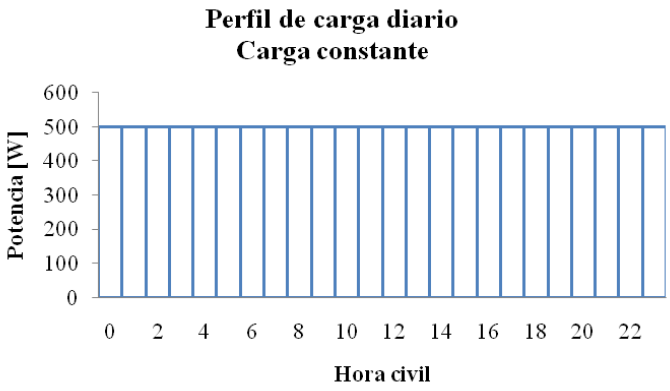


Figura 4.10: Perfil de carga diario de una carga constante.

5 Ensayos realizados

Se realizaron pruebas en el sistema híbrido que consistieron en medir experimentalmente la corriente y el voltaje, entre otras variable, entregado por los distintos elementos del sistema para condiciones de carga variable a lo largo de un día de medición. Se comprobó que la mayor parte de la energía total entregada proviene del grupo electrógeno. Se muestran los procedimientos de medición y los resultados obtenidos.

5.1 Introducción a la teoría

Para calcular la potencia instantánea que entrega cada equipo, se emplea la siguiente ecuación,

$$P=V*I \tag{4}$$

Donde P es potencia eléctrica en Watt, V es el voltaje en Volt y I es la corriente en Ampere.

Cuando se trata de corriente alterna, como la entregada por el grupo electrógeno, la potencia activa se calcula de la siguiente forma,

$$P=V_{rms}*I_{rms}*\text{Cos}\ \varphi \tag{5}$$

Donde V_{rms} es el valor rms del voltaje, I_{rms} es el valor rms de la corriente, φ es el ángulo de desfase entre la corriente y el voltaje.

Como en esta experiencia solo se analizan cargas de tipo resistivas, φ es igual a cero, y la potencia activa entregada por el grupo electrógeno se calcula simplemente como:

$$P=V_{rms}*I_{rms} \quad (6)$$

Luego, la energía que entrega cada equipo se puede calcular como:

$$E=P*\Delta t*\frac{1}{3600} \quad (7)$$

Donde E es la energía en Wh, Δt es el intervalo de tiempo, en segundos, durante el cual se realiza la medición. El factor $\frac{1}{3600}$ sirve para convertir el tiempo de segundos a horas y así el resultado quede en Wh.

5.2 Procedimiento experimental

Los equipos utilizados para realizar los ensayos se especifican en el capítulo 3.

Cabe destacar que las variables de corriente de entrada del arreglo fotovoltaico y la corriente de entrada del grupo electrógeno no pudieron ser registradas por el software WatchPower, por lo tanto, se utilizó una placa Arduino y sensores de corriente para medir las variables aludidas. Más características sobre la placa utilizada y los sensores utilizados se encuentran en Anexo C. Los códigos de programación utilizados se encuentran en Anexo D.

Antes de realizar las mediciones, se conectó el inversor multifuncional al computador donde se reciben los datos mediante el cable RS232 provisto por el proveedor del inversor y un adaptador RS232 a USB. Por otro lado, se conectó la placa Arduino, previamente conectada a la protoboard y a los sensores de corriente, mediante cable USB al computador y se cargó el código que permite medir los valores de los sensores. Además, se instaló el piranómetro de manera coplanar a los paneles fotovoltaicos para medir la irradiancia solar.

Se configuró el sistema para utilizar la energía solar como prioridad. Se estableció que el sistema entrará en Line Mode cuando el voltaje de la batería caiga a 11,5 V y volverá a

Batery Mode cuando el voltaje alcance los 13,5 V. El software WatchPower registró los datos cada 60 segundos. Además, el software registra la hora local la cual es adquirida a través del computador en el que está trabajando. Otras configuraciones se pueden observar en la Figura 4.7.

Luego, se comprobó que todos los equipos estuvieran conectados al inversor, es decir, el arreglo fotovoltaico conectado a la entrada PV del inversor, la batería conectada a la entrada DC y el grupo electrógeno conectado a la entrada AC del inversor.

A continuación, se conectó el juego de cargas al sistema y se encendieron ampolletas de 100 y 50 W nominal para crear un perfil de carga del tipo de la Figura 4.8. La Tabla 5.1 muestra la carga nominal que se aplicó en cada hora.

Tabla 5.1: Carga nominal aplicada durante cada hora.

Hora local	**Carga [W]**
8:00	250
9:00	250
10:00	250
11:00	250
12:00	300
13:00	300
14:00	300
15:00	300
16:00	300
17:00	350
18:00	450
19:00	550
20:00	550

Las mediciones se realizaron el día 22 de marzo de 2016 desde las 8:00 hasta las 21:00 hora local. El sitio geográfico de medición fue el lugar de emplazamiento del sistema, descrito en el capítulo 3.

De esta forma se midieron el voltaje y la corriente que fluye por los terminales de la batería, del grupo electrógeno y del arreglo fotovoltaico. Además se midió la potencia instantánea de salida del inversor para alimentar la carga. También se midió la hora local en que se realiza la medición. Todas estas variables se midieron de forma simultánea cada un minuto. La radiación solar también se registró cada un minuto.

5.3 Resultados obtenidos

La Figura 5.1 muestra la potencia instantánea entregada por el grupo electrógeno y el arreglo fotovoltaico a lo largo del día de medición. También se muestra la irradiancia solar.

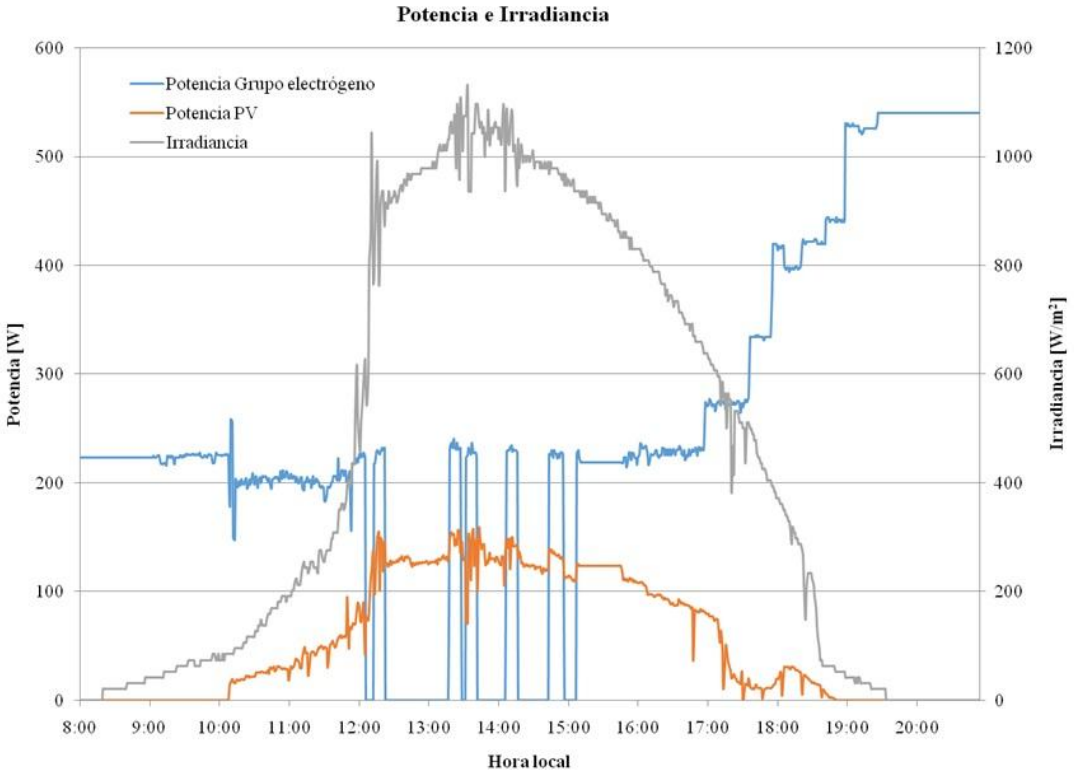


Figura 5.1: Irradiancia solar y potencia instantánea entregada por el grupo electrógeno y el arreglo fotovoltaico a lo largo del día de medición.

La Figura 5.2 muestra de forma más detallada la potencia instantánea entregada por el grupo electrógeno y el arreglo fotovoltaico. También se muestra la potencia entregada por la batería al descargarse y recibida al cargarse. Se muestran los valores entre las 11 y las 17 horas, ya que en este intervalo se puede observar con más detalle el funcionamiento de las tres fuentes en acción.

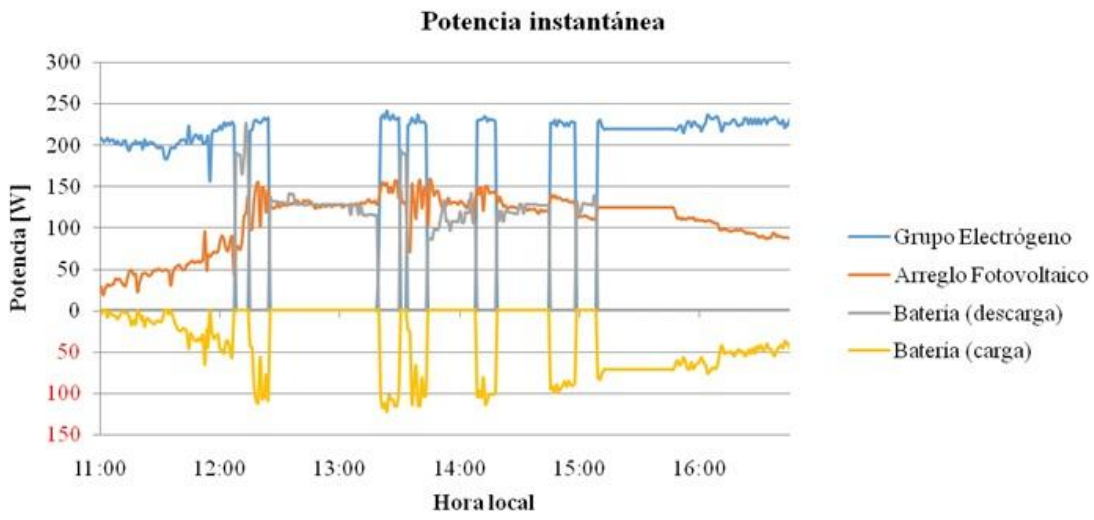


Figura 5.2: Potencia instantánea entregada por las distintas fuentes entre las 11 y las 17 horas.

La Figura 5.3 muestra la energía que entrega el grupo electrógeno y el arreglo fotovoltaico. También se puede observar la energía que entrega la batería al descargarse y recibida al cargarse. Se muestran los valores de energía en lapsos de una hora, durante todo el día de medición.

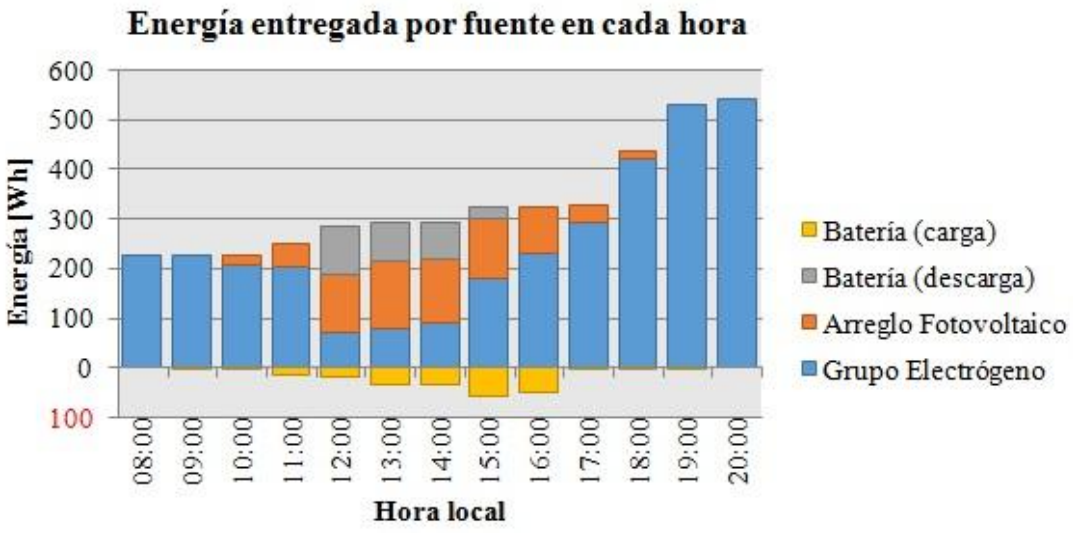


Figura 5.3: Energía entregada por las distintas fuentes en cada hora.

La Figura 5.4 muestra el porcentaje de la energía total entregada por cada fuente durante el día de medición. La energía entregada por la batería corresponde a la energía neta, es decir, la energía entregada para alimentar la carga menos la energía recibida para cargarse.

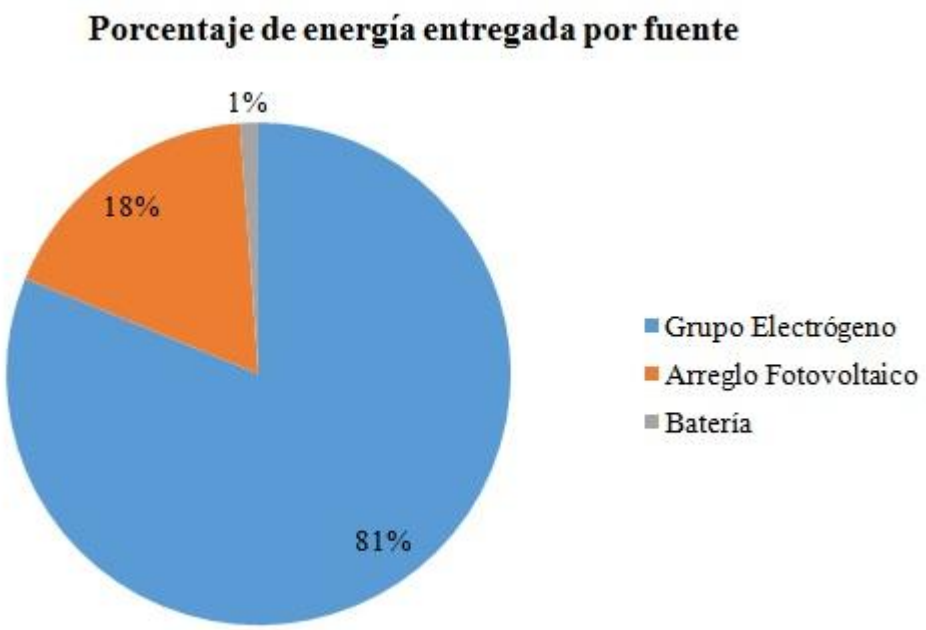


Figura 5.4: Porcentaje de energía entregada por cada fuente a lo largo del día de medición.

5.4 Análisis de resultados

Primero que todo, se puede observar a simple vista, en la Figura 5.1, que el grupo electrógeno es la principal fuente que entrega energía a lo largo de la experiencia. Se puede apreciar con más detalle que el grupo electrógeno funcionó de manera continua desde las 8 horas hasta las 12 horas aproximadamente, luego entre las 12 y las 15 horas aproximadamente, el grupo electrógeno funcionó de manera alternada, luego, pasada las 15 horas volvió a funcionar de manera continua hasta las 21 horas. También se puede observar que el arreglo fotovoltaico entregó potencia desde las 10 hasta 19 horas aproximadamente, teniendo un “peak” entre las 12:30 y las 15:30 horas, coincidiendo con el perfil de irradiancia solar.

Cabe destacar que durante el día de medición, se observó una mañana muy nublada, pasando a una tarde despejada desde las 12 horas aproximadamente, tendencia que puede ser apreciada en el perfil no simétrico de irradiancia de la Figura 5.1.

Se puede observar, en el perfil de potencia entregada por el arreglo fotovoltaico de la Figura 5.1, una pequeña caída de la curva alrededor de las 17:30 y luego una pequeña subida pasada las 18 horas, esto se debe a las condiciones geográficas del lugar de medición, existiendo grandes árboles en los alrededores que provocaron un sombreamiento parcial de los paneles fotovoltaicos.

Si bien los paneles fotovoltaicos tienen una potencia peak de 100 [W] en condiciones de irradiancia de 1000 [W/m^2] y temperatura del panel de 25 [°C], debiendo entregar 300 [W] entre los tres paneles, se puede observar en la Figura 5.1 que el arreglo fotovoltaico solo entrega alrededor de 150 [W] aun cuando se tienen condiciones de irradiancia de 1000 [W/m^2] entre las 13 y las 14 horas. Esto se debe principalmente a que uno de los paneles fotovoltaicos no estaba en condiciones óptimas de funcionamiento, como se describe en el capítulo 3.

Se puede apreciar en la Figura 5.2, después de las 12 horas, el funcionamiento alternado del sistema entre “battery mode” y “line mode”, descritos en el capítulo 4. Se puede observar que la batería se descarga, para entregar su energía, durante el modo de funcionamiento “battery mode” y se carga en “line mode”, en ningún momento la batería se carga en “battery mode” ya que nunca se da el caso de tener energía solar de sobra, es decir, que la energía solar sea mayor a la carga del sistema y de esta forma poder almacenar la energía sobrante. Sin embargo, la batería ayuda a entregar energía cuando el generador aun no estabiliza su temperatura normal de funcionamiento; además, en casos de tener cortos peaks de potencia, la batería ayudaría a absorber estas singularidades. Se aprecia que el lapso de funcionamiento en “battery mode” más largo se da luego de las 12 horas hasta poco después de las 13 horas, coincidiendo con altos valores de irradiancia registrados.

Se puede observar en la Figura 5.3, al igual que en la Figura 5.1, que el grupo electrógeno es la principal fuente que entrega energía a lo largo de todo el día de medición. Durante las dos primeras horas de ensayo, el grupo electrógeno es la única fuente que entrega energía, ocurre lo mismo durante las dos últimas horas de ensayo. Durante las 12, las 13 y las 14 horas, el arreglo fotovoltaico junto con la batería son las principales fuentes que entregan energía.

Por último, la Figura 5.4 muestra que el grupo electrógeno es la mayor fuente que entrega energía durante todo el día, alcanzando un 81% de la energía total entregada. El arreglo fotovoltaico entrega un 18% de la energía total. La energía neta entregada por la batería, es decir, la energía que entrega menos la que recibe, alcanza el 1%.

Se puede concluir que, para las condiciones geográficas y climáticas dadas durante el ensayo, el grupo electrógeno es la principal fuente de entrega de energía. Para aumentar el porcentaje de energía que entrega el arreglo fotovoltaico, se debería utilizar paneles fotovoltaicos en mejor estado que los utilizados en la experiencia. También, un arreglo fotovoltaico de mayor tamaño ayudaría a aumentar la energía total entregada por éste. Considerando las condiciones externas al propio sistema, un perfil de irradiancia mayor también ayudaría a ampliar el porcentaje de energía entregada por la fuente renovable.

6 Estimación del valor de la electricidad autogenerada

En este capítulo se presenta el cálculo que se realizó para obtener el precio de la energía eléctrica autogenerada para un VAN tendiente a cero. Se muestra la inversión realizada para implementar el sistema híbrido PV-MCI-Batería y una estimación de los costos de operación y mantenimiento del sistema. Se utilizaron los valores obtenidos en la experiencia realizada como día representativo, ya que, como se observó en el capítulo 5, el día de otoño en que se realizó la prueba se presentó nubosidad matinal variando a despejado durante la tarde, obteniéndose distintos valores de radiación solar a lo largo del día.

6.1 Inversión

La inversión realizada corresponde a la valorización de todos los equipos y accesorios utilizados para la instalación del sistema híbrido. La Tabla 6.1 muestra los valores de los equipos instalados. El ítem "accesorios de conexión" corresponde a todos los conectores eléctricos utilizados, descritos en el capítulo 4.

Tabla 6.1: Valores de los equipos utilizados.

Equipo	**Precio**
Inversor multifuncional	$ 252.762
Grupo electrógeno	$ 74.400
Batería	$ 139.640
Paneles fotovoltaicos	$ 300.000
Accesorios de conexión	$ 75.000
Total inversión	**$ 841.802**

6.2 Operación y mantenimiento

El grupo electrógeno es el principal equipo del sistema hibrido que implica costos de operación y mantención. Tanto la batería como el inversor no necesitan mantención. Los paneles fotovoltaicos necesitan de una limpieza para eliminar el polvo acumulado en su superficie, pero el costo de esta mantención es despreciable comparado con el costo de mantención del grupo electrógeno.

6.2.1 Operación del grupo electrógeno

Para calcular los costos de operación del grupo electrógeno, se utilizaron los valores constantes que se muestran en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Valores constantes para calcular los costos de operación del grupo electrógeno.

Horas de operación diaria	10,87
Consumo de mezcla a 3/4 Pnom. [L/h]	0,7
Razón mezcla (aceite-gasolina)	1:40
Precio gasolina 93 [$/L]	$ 680
Precio aceite 2T [$/L]	$ 5.000

Observaciones:

- Las horas de operación diaria del grupo electrógeno corresponden al tiempo en funcionamiento del grupo electrógeno durante la experiencia realizada.
- Según el catálogo del grupo electrógeno utilizado, el consumo de mezcla a ¾ de la potencia nominal corresponde a 0,7 [L/h]. Como se puede observar en la Figura 5.1 el grupo electrógeno trabaja aproximadamente, a lo largo del día, a una potencia de ¾

de la potencia nominal, por lo tanto, se utiliza este valor de consumo de mezcla en los cálculos.

- La razón de mezcla entre aceite y gasolina utilizada e indicada por el fabricante del grupo electrógeno es 1:40.
- Tanto el precio de la gasolina como del aceite utilizado corresponden al valor actual de estos insumos en el comercio.

Con las variables mostradas en la tabla anterior, se obtuvieron los resultados de la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Costo de operación anual del sistema híbrido implementado.

Mezcla consumida [L/día]	7,61
Gasolina consumida [L/día]	7,42
Aceite consumido [L/día]	0,19
Costo gasolina [$/día]	$ 5.048
Costo aceite [$/día]	$ 928
Costo mezcla [$/día]	$ 5.976
Costo operación [$/año]	**$ 2.181.185**

Observaciones:

- La mezcla consumida diaria se obtiene al multiplicar las horas de operación diaria por el consumo de mezcla a ¾ de la potencia nominal.
- Tanto la gasolina como el aceite consumido al día se obtienen al multiplicar la mezcla consumida por su respectiva proporción de consumo.
- Tanto el costo de la gasolina como del aceite consumido al día se obtienen al multiplicar el respectivo volumen consumido por su precio por litro. El costo de la mezcla utilizada al día es la suma de los costos de gasolina y aceite.
- Finalmente, el costo de operación anual corresponde al costo de la mezcla utilizada al día por el número de días del año.

6.2.2 Mantenimiento del grupo electrógeno

Las principales piezas que deben ser reemplazadas luego de 250 horas de operación, para un grupo electrógeno pequeño, son el filtro de aire y la bujía [20]. Además, se considera una mantención mayor una vez al año consistente en revisar cada pieza del grupo electrógeno y su reemplazo en caso de presentar fallas. Se estima un costo de mantención anual de $90.000.-

6.3 Determinación del costo de generación [$/kWh]

Se determinó el costo de autogeneración de energía eléctrica con el sistema híbrido implementado utilizando una tasa de descuento de 5% y un horizonte del proyecto de 10 años. Se estimó una generación de energía eléctrica anual de 1460 kWh, generando energía eléctrica todos los días del año, basándose en el valor de 4 kWh diario producido durante la experiencia realizada.

En anexo D se puede observar el flujo de caja realizado. Se realiza una sola inversión en el año cero, que corresponde a la valorización del sistema implementado mostrado al principio de este capítulo. Los costos de operación y mantenimiento se realizan una vez al año desde el año uno. El costo de la energía anual se obtiene al multiplicar el precio de la energía por la energía producida. El precio de la energía [$/kWh] se obtiene mediante iteración hasta lograr un VAN cercano a cero.

Se obtuvo un precio de la energía de 1650 [$/kWh] para un VAN cercano a cero. Este valor indica que, para un precio de la energía eléctrica (proveniente de una empresa distribuidora) igual o mayor al obtenido, este proyecto sería rentable y más conveniente, en términos económicos, que estar conectado a la red. Como el precio de la energía eléctrica es varias veces menor al calculado [18], se concluye que el sistema implementado no es una alternativa conveniente para generar energía eléctrica cuando existe la posibilidad de conectarse a la red.

7 Conclusiones

Se cumplió el objetivo general de este trabajo al diseñar e implementar un sistema híbrido PV-MCI-Batería en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Técnica Federico Santa María y mostrar el desempeño de éste al hacer pruebas de carga de forma didáctica mediante un juego de ampolletas.

Se cumplieron los objetivos específicos de este trabajo al estudiar los sistemas híbridos PV-MCI-Batería, se mostraron las características principales de los componentes que lo constituyen y se detalló cómo se interrelacionan entre ellos para formar un solo sistema de generación de energía eléctrica autónomo e ininterrumpible. Se mostró el estado del arte de los sistemas híbridos PV-MCI-Batería, donde se pudieron observar los diferentes estudios que existen al respecto, tanto en materia de optimización en el diseño y la operación del sistema, como en sistemas implementados y probados. También se nombraron los principales sistemas híbridos implementados y en funcionamiento tanto en Chile como en el extranjero, se pudo observar que existen variados sistemas instalados en zonas remotas donde no existen redes de energía eléctrica, además, en procesos industriales también se pueden encontrar sistemas híbridos.

Además, se mostraron los principales componentes constituyentes de un sistema híbrido que se ofrecen tanto en el mercado nacional como internacional, se observan inversores, grupos electrógenos, paneles fotovoltaicos y baterías. En base a estos equipos analizados, se seleccionaron los que conformaron el sistema híbrido implementado.

Por otro lado, se desarrolló un manual de uso del sistema, que muestra cómo se deben realizar las conexiones entre los distintos componentes, se detallan las configuraciones que se pueden realizar y cómo operar el sistema. Además se mostraron diversos perfiles de carga tanto residencial como industrial, los cuales pueden ser probados en el sistema para observar el funcionamiento bajo distintas condiciones.

Se mostró el funcionamiento del sistema al probar un perfil de carga típico de una comunidad rural. Se comprueba que el grupo electrógeno es la principal fuente que entrega energía, con un 81% de la energía total entregada, el arreglo fotovoltaico entrega un 18% y la batería un 1% de energía neta. Estos valores pueden cambiar al probar otro perfil de carga o al cambiar las condiciones climáticas.

Se comprobó que un sistema híbrido es un sistema de generación de energía eléctrica autónomo que no depende de fuentes externas y además entrega energía ininterrumpidamente, de la cual cierto porcentaje provendrá de una fuente renovable, la que ayudará a disminuir el uso de la fuente convencional y por lo tanto reducir la contaminación atmosférica.

Se mostró que el costo de la energía producida por el sistema híbrido implementado, para un horizonte de proyecto de 10 años, es varias veces mayor al precio actual de la energía de la red, haciendo poco conveniente, en términos económicos, la utilización de este sistema en reemplazo de la energía proveniente del sistema interconectado. Sin embargo, el sistema hibrido implementado mantiene sus ventajas ya mencionadas de ser un sistema autónomo e ininterrumplible, además de la conveniencia de su utilización en zonas remotas donde no es posible conectarse a la red.

Se propone como trabajo futuro aumentar el tamaño del arreglo fotovoltaico para observar cómo aumenta la energía solar entregada. Sin embargo, se debe realizar un estudio de factibilidad económica para observar la conveniencia de este cambio y limitar el tamaño del arreglo fotovoltaico.

Además se propone estudiar el sistema bajo distintos tipos de carga, ya sea resistivas, capacitivas, inductivas o una combinación de éstas, y analizar el comportamiento del grupo electrógeno y del sistema en general.

Referencias

[1] MPP Solar. PIP-HS 1-5KVA Inverter Charger User Manual [en línea] <http://www.mppsolar.com/manual/PIP-HS%201-5KVA.PDF> [consulta: 20 abril 2016]

[2] KALOGIROU, Soteris. Solar energy engineering: process and systems. Elsevier, 2009.

[3] LÉNA, Grégoire, Rural Electrification with PV Hybrid Systems. IEA PVPS, 2013.

[4] LINDEN, David y REDDY, Thomas B. Handbook of Batteries. 3° ed. McGraw-Hill, 2002.

[5] VICTRON Energy. Wich solar charge controller: PWM or MPPT? [en línea] <https://www.victronenergy.com/blog/2014/07/21/which-solar-charge-controller-pwm-or-mppt/> [Consulta: 20 abril 2016]

[6] EVALUATING the impact of adding energy storage on the performance of a hybrid power system por Headly Jacobus… [et al]. Energy Conversion and Management, 52(7): 2604-2610, Julio 2011.

[7] DUFO-LÓPEZ, Rodolfo y BERNAL-AGUSTÍN, José L. Influence of mathematical models in design of PV-Diesel systems en Energy Conversion and Management, 49(4): 820-831, Abril 2008.

[8] SHAAHID, S.M y ELHADIDY, M.A. Opportunities for utilization of stand-alone hybrid (photovoltaic + diesel + battery) power systems in hot climates en Renewable Energy, 28(11): 1741-1753, Septiembre 2003.

[9] FEASIBILITY study of hybrid Diesel–PV power plants in the southern of Algeria: Case study on AFRA power plant por A. Khelif… [et al]. Electrical Power and Energy Systems, 43(1): 546-553, Diciembre 2012.

[10] OPTIMAL sizing of building integrated hybrid PV/diesel generator system for zero load rejection for Malaysia por Tamer Khatib… [et al]. Energy and Buildings, 43(12): 3430-3435, Diciembre 2011.

[11] MUSELLI, M., NOTTON, G., Y LOUCHE, A. Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management. Solar Energy, 65(3): 143-157, 1999.

[12] NAYAR, Chemmangot V., ASHARI Mochamad, y KEERTHIPALA, W. W. L. A Grid-Interactive Photovoltaic Uninterruptible Power Supply System Using Battery Storage and a Back Up Diesel Generator. IEEE Transactions on Energy Conversion, 15(3): 348-353, Septiembre 2000.

[13] NEMA, Pragya, NEMA, R.K., y RANGNEKAR, Saroj. A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(8): 2096-2103, Octubre 2009.

[14] MINERA Escondida. Ingeniería de detalles y de terreno Proyecto Nueva Estación ECT, Antofagasta, 2014.

[15] SUN Microsystem. WatchPower User Manual. [en línea] <http://www.mppsolar.com/v3/catalogs/WatchPower%20user%20manual.pdf> [Consulta: 20 abril 2016]

[16] GUERRA Baeza, Luis David. Estudio de factibilidad técnico/económica de un sistema híbrido de generación de energía eléctrica para escuelas de Quinchao. Memoria (Ingeniería Civil Mecánica). Santiago de Chile. UChile, 2013. 96 h.

[17] DEPTH profiling of degradation of multilayer photovoltaic backsheets after accelerated laboratory weathering: Cross-sectional Raman imaging por Chiao-Chi Lin… [et. al.]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 144(2016): 289–299, Septiembre 2015.

[18] GENERADORAS de chile A.G. Boletín del mercado eléctrico [en línea]. <http://generadoras.cl/wp-content/uploads/Bolet%C3%ADn-Generaci%C3%B3n-Mayo-2016.pdf> [Consulta: 10 agosto 2016].

[19] BOSH, Robert. Automotive handbook. U. Adler, 1993.

[20] GIANGRANDI, Leonardo. Aspectos técnico económicos para evaluación de proyectos de cogeneración en base a grupos generadores diesel. Memoria (Ingeniería Civil Eléctrica). Santiago de Chile. PUC, 2011.

[21] SMA . Sunny Tripower 20000TL/25000TL [en línea]. <http://www.sma.de/en/products/solarinverters/sunny-tripower-20000tl-25000tl.html> [Consulta: 10 agosto 2016].

[22] VICTRON Energy, Multiplus [en línea]. <https://www.victronenergy.com.es/inverters-chargers/multiplus-12v-24v-48v-800va-3kva> [Consulta: 10 agosto 2016].

[23] VOLTRONIC Power, Axpert MKS 1KVA-5KCA Inverter. [en línea] <http://www.voltronicpower.com/oCart2/index.php?route=product/product&product_id=132> [Consulta: 10 agosto 2016]

[24] POWER Pro 0,8KW 220V [en línea]. <http://www.industrialpartner.cl/index.php/online-store/generacion/generadores-a-gasolina/generador-2t-0,8-kw-1-detail> [Consulta: 10 agosto 2016].

[25] POWER Pro 2.5 KVA DG2500. [en línea]. <http://www.sodimac.cl/sodimac-cl/product/2514648/Generador-2.5-KVA-Gas-DG2500/2514648> [Consulta: 10 agosto 2016].

[26] LUREYE 40 – 275 KVA. [en línea] <http://www.lureyechile.cl/cms/Default.aspx?pag=6&prodID=1321> [Consulta: 10 agosto 2016].

[27] PV Policristalino 150 W. [en línea]. <http://www.aquitosolar.cl/paneles-fotovoltaicos/209-PVPP150SW.html> [Consulta: 10 agosto 2016].

[28] PV Monocristalino 250 W. [en línea]. <http://www.aquitosolar.cl/paneles-fotovoltaicos/484-PVP250IEC.html> [Consulta: 10 agosto 2016].

[29] PV flexible 20W [en línea] .< http://www.tiendafotovoltaica.es/Panel-solar-flexible-20w-de-alta-eficiencia>. [Consulta: 10 agosto 2016].

[30] CURTISS 12V 15 AH. [en línea]. <http://www.solarshop.cl/product.php?id_product=21> [Consulta: 10 agosto 2016].

[31] ULTRACELL UC 10. [en línea] <http://panelsolarchile.cl/productos/baterias/bateria-ultracell-uc-10> [Consulta: 10 agosto 2016].

[32] HEINHELL BT-PG 40 user manual [en línea] <https://assets.einhell.com/im/imf/none/900_289000> [Consulta: 10 agosto 2016].

[33] CURTISS CT12 1000 [en línea]. <http://www.solarshop.cl/product.php?id_product=30>. [Consulta: 10 agosto 2016].

Anexos

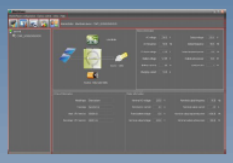
Anexo A: Catálogo del inversor

OFF GRID SOLAR INVERTER

PIP-HS SERIES

- LCD DISPLAY
- HIGH FREQUENCY
- PURE SINE WAVE
- AC CHARGER
- MONITORING
- STACKABLE*
- PB ACID /LIFEPO4

* Only on 48v models



PIP-HS series	812	NEW 1212 (1224)	1624	2424	3248	4048
ELECTRICAL SPECIFICATIONS						
Continuous Output	800W	1200W	1600W	2400W	3200W	4000W
Surge Rating	5 seconds max, 2X					
Input Power Factor	0.8					
Input Voltage Range	90~280VAC (Appliance mode), 170~280VAC (UPS mode)					
Input Max Voltage	300VAC					
Input/Output Frequency	50Hz / 60Hz					
Output Voltage	230VAC±5%					
Output Waveform	Pure Sine Wave					
Output Regulation	< 3% RMS for battery voltage range					
Output Short Circuit	Circuit Breaker					
Peak Efficiency	>95% (line mode) / 91% (inverter mode)					
Nominal DC Voltage	12V	12V (24V)	24V		48V	
Transfer Time	<10ms (UPS mode), <20ms (Appliance mode) **					
Charging Mode	3-stage					
Boost Volt (Flooded, AGM)	14.6, 14.1V	14.6, 14.1V (29.2, 28.2V)	29.2, 28.2V		58.4, 56.4V	
Float Volt	13.5V	13.5V (27V)	27.0V		54.0V	
AC Recharging Current	10/20amp	60 amp	20/30amp		60 amp	
No Load Consumption	<15W	<15W (<20W)	<20W		<50W	
Power Saving Consumption	<5W	<5W (<10W)	<10W		<15W	
Solar Charger						
Type, Max Charging Current	PWM, max 50 Amp					
System DC Voltage	12V	12V (24V)	24V		48V	
Max PV Input Voc	30V	40V (75V)	60V		90V	
Standby Power	1W	1W (2W)	2W			
ENVIRONMENTAL / MECHANICAL SPECIFICATIONS						
Certification	CE					
Operating/Storage Temp.	0°C ~ 55°C / -15°C~ 60°C					
Operating Humidity	20~90%RH Non-Condensing					
Dimension	316*240*95mm	355*272*100mm	355*272*100mm		468*295*120mm	
Net Weight	5.0Kg	6.8Kg	6.5Kg	7.0Kg	10Kg	10Kg

KEY FEATURES

- High frequency pure sine wave design
- Multi-functional inverter-charger with programmable menus
- Inverter + 60A AC Charger + 50A Solar Charger
- Total system charging : 50A + 60A = 110A !!
- Adjustable Bulk/Float Volt and charging current
- Wide AC input range
- Lightweight, easy to install
- 2X surge capacity max 5s
- FREE monitoring software
- LCD Display + LED indicators
- Support main battery types e.g. Lead Acid, LiFePO4*
- Built-in genset starter dry contact**
- USB communication interface

Only 48V models are PARALLEL –READY. Optional Parallel Kit is required for all units in parallel and sold separately.

Note: Product specifications are subject to change without prior notice. MPP Solar is a registered trademark of MPP Solar Inc.

*For LiFePo4 suitability, please check with your battery supplier on charging and BMS requirement.
** Inverter-Generators are recommended for better compatibility

sales@mppsolar.com | www.mppsolar.com

MPP Solar
Buying Solar should be this easy

Anexo B: Requisitos de sistema para instalar WatchPower

A continuación se muestran los requisitos de sistema para instalar el software WatchPower:

- 512 MB de memoria física por lo menos (se recomienda 1 GB)
- 2 GB de espacio de disco duro por lo menos.
- Más de 32-bit de color y resolución de pantalla de 1280 x 800 o superior es recomendado.
- Un puerto de comunicación disponible.
- Plataformas soportadas por el software:
    - Windows XP/2000/2003/Vista/2008 (32-bit & 64-bit)
    - Windows 7/8 (32-bit & 64-bit)
    - Windows SBS 2011
    - Linux RedHat 8, 9
    - Linux RedHat Enterprise AS3, AS5, AS6 (32-bit)
    - Linux RedHat Enterprise AS6 (64-bit)
    - Linux RedHat Enterprise 5.2 (32-bit & 64-bit)
    - Linux SUSE 10 (32-bit & 64-bit)
    - Linux Cent OS 5.4 (32-bit)
    - Linux Ubuntu 8.X, 9.X, 10.X (32-bit)
    - Linux Ubuntu 10.X (64-bit)
    - Linux Ubuntu 12.04 (32-bit & 64-bit)
    - Linux Fedora 5
    - Linux OpenSUSE 11.2 (32-bit & 64-bit)
    - Linux Debian 5.x, 6.x (32-bit)
    - Linux Debian 6.x (64-bit)

Anexo C: Características de la placa Arduino y de los sensores de corriente

Arduino es una placa de desarrollo de código abierto que integra un microcontrolador y un entorno de desarrollo. Esta placa puede recibir señales desde distintos sensores y puede actuar sobre otros componentes electrónicos. En este trabajo se utiliza una placa Arduino para recibir valores de un sensor de corriente y registrarlos en un computador. El sensor utilizado es de la marca Allegro modelo ACS712 capaz de medir corriente AC y DC. La placa utilizada es una Arduino Uno Rev. 3. Las principales características de esta placa son las siguientes:

- Microcontrolador ATmega328.
- Voltaje de entrada 7-12V.
- 14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM).
- 6 entradas análogas.
- 32k de memoria Flash.
- Reloj de 16MHz de velocidad.

Más características sobre el sensor se pueden ver en el siguiente catálogo.

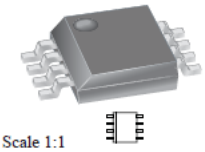
Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

Features and Benefits

- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the new FILTER pin
- 5 µs output rise time in response to step input current
- 80 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% at T_A= 25°C
- Small footprint, low-profile SOIC8 package
- 1.2 mΩ internal conductor resistance
- 2.1 kVRMS minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage

TÜV America
Certificate Number:
U8V 06 05 54214 010

Package: 8 Lead SOIC (suffix LC)



Approximate Scale 1:1

Description

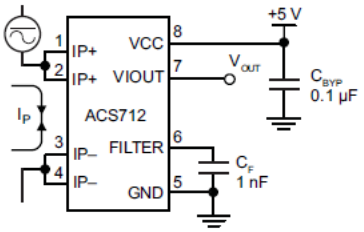
The Allegro™ ACS712 provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in industrial, commercial, and communications systems. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, switch-mode power supplies, and overcurrent fault protection. The device is not intended for automotive applications.

The device consists of a precise, low-offset, linear Hall circuit with a copper conduction path located near the surface of the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which the Hall IC converts into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy after packaging.

The output of the device has a positive slope (>$V_{IOUT(Q)}$) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from pins 1 and 2, to pins 3 and 4), which is the path used for current sampling. The internal resistance of this conductive path is 1.2 mΩ typical, providing low power loss. The thickness of the copper conductor allows survival of

Continued on the next page…

Typical Application



Application 1. The ACS712 outputs an analog signal, V_{OUT}, that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sampled current, I_P, within the range specified. C_F is recommended for noise management, with values that depend on the application.

Description (continued)

the device at up to 5× overcurrent conditions. The terminals of the conductive path are electrically isolated from the signal leads (pins 5 through 8). This allows the ACS712 to be used in applications requiring electrical isolation without the use of opto-isolators or other costly isolation techniques.

The ACS712 is provided in a small, surface mount SOIC8 package. The leadframe is plated with 100% matte tin, which is compatible with standard lead (Pb) free printed circuit board assembly processes. Internally, the device is Pb-free, except for flip-chip high-temperature Pb-based solder balls, currently exempt from RoHS. The device is fully calibrated prior to shipment from the factory.

Selection Guide

Part Number	Packing*	T_A (°C)	Optimized Range, I_P (A)	Sensitivity, Sens (Typ) (mV/A)
ACS712ELCTR-05B-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	–40 to 85	±5	185
ACS712ELCTR-20A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	–40 to 85	±20	100
ACS712ELCTR-30A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	–40 to 85	±30	66

*Contact Allegro for additional packing options.

Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Supply Voltage	V_{CC}		8	V
Reverse Supply Voltage	V_{RCC}		–0.1	V
Output Voltage	V_{IOUT}		8	V
Reverse Output Voltage	V_{RIOUT}		–0.1	V
Output Current Source	$I_{IOUT(Source)}$		3	mA
Output Current Sink	$I_{IOUT(Sink)}$		10	mA
Overcurrent Transient Tolerance	I_P	1 pulse, 100 ms	100	A
Nominal Operating Ambient Temperature	T_A	Range E	–40 to 85	ºC
Maximum Junction Temperature	T_J(max)		165	ºC
Storage Temperature	T_{stg}		–65 to 170	ºC

Isolation Characteristics

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Unit
Dielectric Strength Test Voltage*	V_{ISO}	Agency type-tested for 60 seconds per UL standard 60950-1, 1st Edition	2100	VAC
Working Voltage for Basic Isolation	V_{WFSI}	For basic (single) isolation per UL standard 60950-1, 1st Edition	354	VDC or V_{pk}
Working Voltage for Reinforced Isolation	V_{WFRI}	For reinforced (double) isolation per UL standard 60950-1, 1st Edition	184	VDC or V_{pk}

* Allegro does not conduct 60-second testing. It is done only during the UL certification process.

Parameter	Specification
Fire and Electric Shock	CAN/CSA-C22.2 No. 60950-1-03 UL 60950-1:2003 EN 60950-1:2001

Anexo D: Código para medir y registrar los datos provenientes de los sensores

Código Arduino para medir corriente AC y DC:

```
//Código para medir corriente AC y DC

int mVperAmp = 100;
double Voltage = 0;
double VRMS = 0;
double AmpsRMS = 0;

void setup()
{
 Serial.begin(9600);
}

void loop()
{

 //obtener corriente AC

 Voltage = getVPP();
 VRMS = (Voltage/2.0) * 0.707;
 AmpsRMS = (VRMS * 1000)/mVperAmp;
 Serial.print(AmpsRMS);
 Serial.print(",");
 delay(29000);

 //obtener corriente DC
```

```
 float average = 0;
 for(int i = 0; i < 1000; i++)
 {
    average = average + (.049 * analogRead(A1) -25);
    delay(1);
 }
 Serial.println(average/1000);
 delay(29000);
}

float getVPP()
{
  float result;
  int readValue;
  int maxValue = 0;
  int minValue = 1024;

    for(int i = 0; i < 1000; i++)
   {
       readValue = analogRead(A0);
       if (readValue > maxValue)
       {
           maxValue = readValue;
       }
       if (readValue < minValue)
       {
           minValue = readValue;
       }
    delay(1);
   }
```

```
  result = ((maxValue - minValue) * 5.0)/1024.0;
  return result;
}
```

Código Processing para registrar en el PC los valores entregados por Arduino:

```
import processing.serial.*;
Serial myPort;
String val;
PrintWriter output;

void setup()
{
  size(300, 300);
  String portName = Serial.list()[0];
  myPort = new Serial(this, portName, 9600);
  output = createWriter("mediciones.txt");
}

void draw()
{

  myPort.bufferUntil('\n');
  val = myPort.readStringUntil('\n');

  if (val != null)
  {
    output.print(hour()+":");
    output.print(minute()+":");
    output.print(second()+",");
    output.print(val);
    output.flush();
    println(val);
  }
```

}

Anexo E: Flujo de caja

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Costo energía	$ 0	$ 2.409.672	$ 2.409.672	$ 2.409.672	$ 2.409.672	$ 2.409.672	$ 2.409.672	$ 2.409.672	$ 2.409.672	$ 2.409.672	$ 2.409.672
Operación y mantención	$ 0	-$ 2.271.185	-$ 2.271.185	-$ 2.271.185	-$ 2.271.185	-$ 2.271.185	-$ 2.271.185	-$ 2.271.185	-$ 2.271.185	-$ 2.271.185	-$ 2.271.185
Inversión	-$ 841.802	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0
Flujo de caja	-$ 841.802	$ 138.487	$ 138.487	$ 138.487	$ 138.487	$ 138.487	$ 138.487	$ 138.487	$ 138.487	$ 138.487	$ 138.487
Flujo de caja actualizado	-$ 841.802	$ 131.892	$ 125.612	$ 119.630	$ 113.933	$ 108.508	$ 103.341	$ 98.420	$ 93.733	$ 89.270	$ 85.019

VAN	$ 0